



Ricerca di Sistema elettrico

## Design sustainable interiors: lighting and wellbeing. Relazione Attività B. L'illuminazione Per Il Benessere

Autori: M. Rossi, D. Casciani, F. Musante

## DESIGN SUSTAINABLE INTERIORS: LIGHTING AND WELLBEING. RELAZIONE ATTIVITÀ B. L'ILLUMINAZIONE PER IL BENESSERE

M. Rossi, D. Casciani, F. Musante (Politecnico di Milano, Dipartimento di Design, Laboratorio Luce)

29 Maggio 2016

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici"

Progetto: D.5 "Innovazione tecnologica, funzionale e gestionale nella illuminazione pubblica ed in ambienti confinati"

Obiettivo: C "Human Centric Lighting"

Responsabile del Progetto: : Nicoletta Gozo, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Design Sustainable Interiors: Lighting And Wellbeing*"

Responsabile scientifico ENEA: Simonetta Fumagalli

Responsabile scientifico Politecnico di Milano: Prof. Maurizio Rossi

# Indice

1	ATTIVITÀ B - L'ILLUMINAZIONE PER IL BENESSERE .....	5
1.1	CASO STUDIO: SIMULAZIONE DI UN INTERNO RESIDENZIALE .....	5
1.1.1	<i>Interno residenziale</i> .....	5
1.1.2	<i>Illuminazione naturale: periodo di valutazione</i> .....	5
1.1.3	<i>Illuminazione naturale: condizioni di cielo</i> .....	6
1.1.4	<i>Illuminazione artificiale</i> .....	11
1.1.5	<i>Locali valutati</i> .....	11
1.1.6	<i>Osservatore: caratteristiche</i> .....	12
1.1.7	<i>Osservatore: punti di vista</i> .....	13
1.1.8	<i>Periodizzazione ed effetti circadiani</i> .....	16
1.1.8.1	Quantità e qualità .....	16
1.1.8.2	Momento dell'esposizione .....	17
1.1.8.3	Durata dell'esposizione .....	18
1.2	RISULTATI DI SIMULAZIONE DELLO SCENARIO LUCE NATURALE (CIELO COPERTO) .....	19
1.2.1	<i>Stanza da letto (cielo coperto)</i> .....	19
1.2.2	<i>Soggiorno (cielo coperto)</i> .....	19
1.2.3	<i>Studio (cielo coperto)</i> .....	20
1.3	RISULTATI DI SIMULAZIONE DELLO SCENARIO LUCE NATURALE (CIELO SERENO) CON O SENZA TENDA .....	24
1.3.1	<i>Stanza da letto (cielo sereno)</i> .....	24
1.3.2	<i>Studio (cielo sereno)</i> .....	24
1.3.3	<i>Soggiorno (cielo sereno)</i> .....	24
1.4	RISULTATI DI SIMULAZIONE DELLO SCENARIO LUCE NATURALE (CIELO INTERMEDIO) CON O SENZA TENDA .....	29
1.4.1	<i>Stanza da letto (cielo intermedio)</i> .....	29
1.4.2	<i>Studio (cielo intermedio)</i> .....	29
1.4.3	<i>Soggiorno (cielo intermedio)</i> .....	29
1.5	RISULTATI DI SIMULAZIONE DELLO SCENARIO LUCE ARTIFICIALE .....	34
1.5.1	<i>Alterazione e sfasamento notturno del sistema circadiano</i> .....	34
1.5.2	<i>Regolazione e rifasamento diurno del sistema circadiano</i> .....	36
1.5.2.1	Stanza da letto .....	36
1.5.2.2	Soggiorno .....	39
1.5.2.3	Studio .....	42
1.6	CONCLUSIONI .....	44
1.6.1	<i>Illuminazione naturale</i> .....	44
1.6.2	<i>Illuminazione artificiale</i> .....	45
1.6.3	<i>Ulteriori studi</i> .....	46
2	ATTIVITÀ B3 .....	47
2.1	CARATTERISTICHE APPARECCHI DI ILLUMINAZIONE PER ANZIANI .....	47
2.2	SISTEMA DI CONTROLLO .....	48
2.3	SENSORI .....	49
2.4	IL SISTEMA CASAMBI .....	58
2.5	IL SISTEMA EYE NUT .....	61
2.6	IL SISTEMA SILVAIR .....	62
2.7	IL SISTEMA LUMEDO .....	64
2.8	SISTEMI CUSTOM .....	66
3	ALLEGATI .....	67
4	REFERENZE BIBLIOGRAFICHE .....	67



## 1 Attività B - L'illuminazione per il benessere

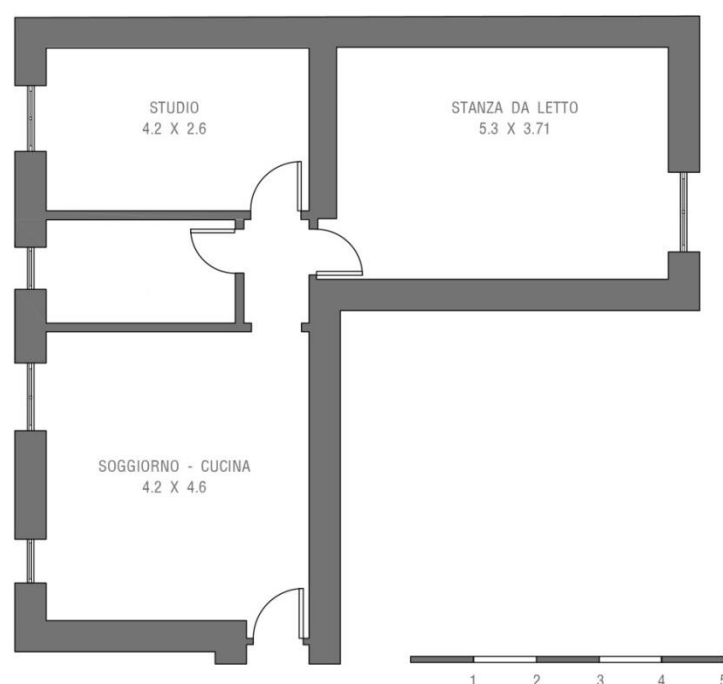
Attività B2. Una fase fondamentale allo sviluppo e approfondimento del concept consiste nello studio di un contesto abitativo e nella simulazione delle condizioni di illuminazione naturale ed artificiale. Tale fase risulta utile a validare l'importanza di una soluzione di illuminazione circadiana in un locale specifico della casa.

### 1.1 Caso studio: simulazione di un interno residenziale

Il modello di simulazione della luce naturale e artificiale per la valutazione dell'effetto circadiano su un soggetto anziano è stato applicato ad un caso studio reale, scegliendo un appartamento residenziale nel quale sono stati testati, tramite un software di simulazione (Dialux Evo), diversi scenari di illuminazione naturale e artificiale. Il rilievo geometrico è stato fatto in situ e riportato tramite disegno in CAD (Figura 1).

#### 1.1.1 Interno residenziale

Per la simulazione degli effetti non visivi dell'illuminazione naturale e artificiale è stato utilizzato un comune appartamento bilocale sito in Milano che dunque si basa su un ambiente reale e ha una configurazione degli spazi e degli ambienti comunemente utilizzata in Italia. L'appartamento è un bilocale di circa 60 mq configurato per ospitare da una a quattro persone, collocato al terzo piano di un edificio residenziale con doppia esposizione (est-ovest). Non presenta occlusioni di altri edifici dato che affaccia su un ampio cortile interno (ovest) e su un parco/giardino (est). È situato in Milano Latitudine 45.504044 Longitudine 9.177164 (Figura 1).



**Figura 1 – Pianta dell'appartamento considerato per la simulazione**

L'appartamento è stato modellato geometricamente per ottenere un'ambiente virtuale identico all'ambiente reale in modo da avere un corrispettivo luogo su cui effettuare dei test dal vero per eventualmente validare i dati ottenuti dalla simulazione.

#### 1.1.2 Illuminazione naturale: periodo di valutazione

Per i calcoli successivi, risulta essenziale definire la distribuzione di luminanza della volta celeste e la distribuzione della temperatura di colore della stessa, dato che si è interessati a valutare gli effetti circadiani dell'illuminazione.

La simulazione della luce naturale è stata effettuata lungo l'arco di un anno prendendo in considerazione quattro date emblematiche corrispondenti all'inizio astronomico delle stagioni (equinozio di primavera 20 marzo, solstizio d'estate 21 giugno, equinozio d'autunno 22 settembre, solstizio d'inverno 21 dicembre, in riferimento all'anno 2017). Le simulazioni sono state effettuate nell'arco di un'intera giornata (nelle quattro stagioni considerate) con cadenza oraria (Tabella 1).

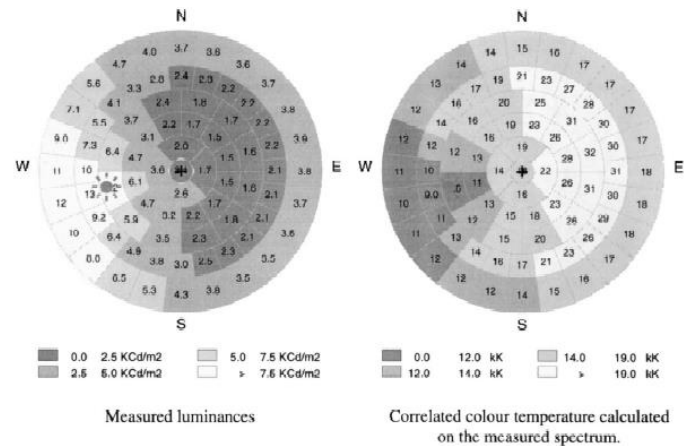
**Tabella 1 - Giorni selezionati per le simulazioni di luce naturale con cadenza oraria**

DATA	STAGIONE	ORARIO INIZIO (SOLARE)	ORARIO FINE (SOLARE)
20 marzo 2017	PRIMAVERA	7.00	18.00
21 giugno 2017	ESTATE	6.00	21.00
22 settembre 2017	AUTUNNO	8.00	19.00
21 dicembre 2017	INVERNO	9.00	16.00

### 1.1.3 Illuminazione naturale: condizioni di cielo

La temperatura correlata di colore del cielo dipende dalle condizioni meteorologiche e temporali: al tramonto, in posizioni vicine al sole, il valore della CCT può essere inferiore a 3000K, un cielo parzialmente coperto può avere una temperatura di colore di 5000K o superiore, mentre un cielo sereno può raggiungere valori superiori a 20000K.

Nel lavoro di Chain et al.<sup>1</sup> è stato proposto un modello che pone in relazione la temperatura correlata di colore e la distribuzione di luminanza del cielo: per l'elaborazione del modello furono effettuate una serie di misure di radianza spettrale della volta celeste dal mese di Aprile a Settembre del 1999 in una stazione di misura situata in Francia (Valux-en-Velin). Sulla base di tali misurazioni è stato ipotizzato un semplice legame tra questi due parametri: a un valore elevato di luminanza corrisponde un valore moderato della temperatura correlata di colore e viceversa.



**Figura 2 - A sinistra i valori di luminanza misurati, mentre a destra sono riportati i valori di temperatura correlata di colore calcolati in base alle distribuzioni spettrali misurate**

Dato che il sistema visivo umano è capace di cogliere piccole differenze nella tonalità della luce tra 3000K e 6000K, piuttosto che tra 10000K e 20000K<sup>2</sup>, la CIE ha introdotto una nuova grandezza mired (mirek nel sistema SI), che rappresenta il reciproco della temperatura di colore espressa in mega-kelvin: in questo modo è possibile definire una scala uniforme rispetto alla percezione della temperatura di colore. È dunque possibile definire in modo semplice la relazione che lega i valori di luminanza del cielo alla temperatura di colore, espressa dalla seguente relazione per condizioni di cielo sereno:

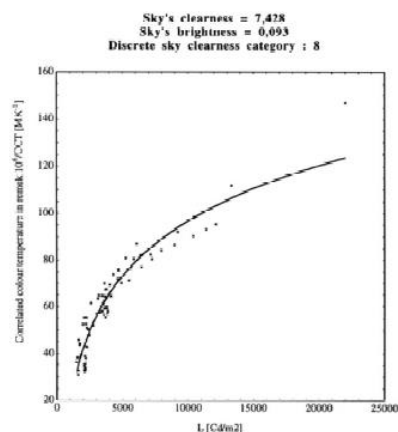
$$\frac{10^4}{CCT} = -\alpha + \beta * \log L$$

Dove:

L : è il valore di luminanza in cd/m<sup>2</sup>

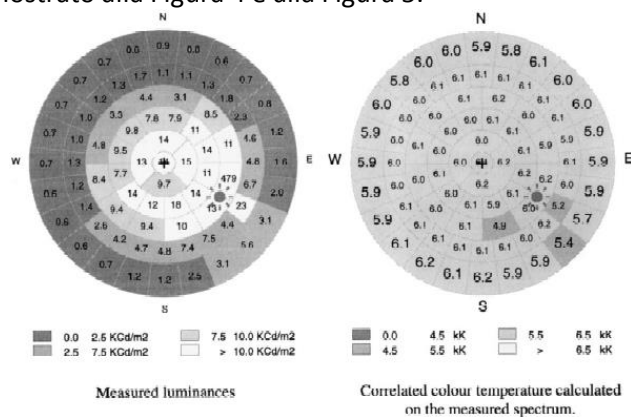
CCT: è il valore correlato della temperatura di colore in K

$\alpha = -132.1$ ,  $\beta = 59.77$  coefficienti che dipendono dal cielo misurato e che sono funzione dalle caratteristiche meteorologiche del cielo (contenuto di acqua nell'atmosfera, quantità di polveri sospese ed altri parametri).

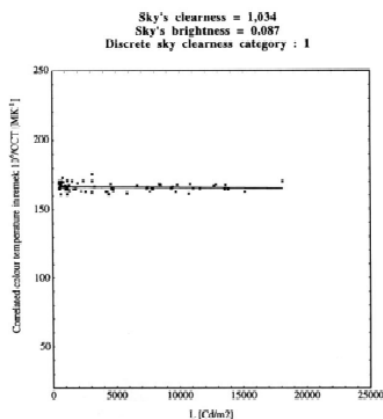


**Figura 3 - Relazione tra il valore di luminanza e la temperatura correlata di colore relativa a un cielo sereno (misure effettuate il 28 Maggio 1997 alle ore 17.00)**

In condizioni di cielo coperto, la temperatura correlata di colore può essere considerata quasi uniforme sulla volta celeste, come mostrato alla Figura 4 e alla Figura 5.



**Figura 4 - A sinistra i valori di luminanza misurati, mentre a destra sono riportati i valori di temperatura correlata di colore calcolati in base alle distribuzioni spettrali misurate (condizioni di cielo coperto)**



**Figura 5 - 5 Legame tra luminanza e temperatura correlata di colore per condizioni di cielo coperto (11 Agosto 1997, ore 11:15)**

Per condizioni di cielo coperto la relazione tra luminanza e temperatura correlata di colore, risulta la seguente:

$$\frac{10^6}{CCT} = \gamma$$

Dove  $\gamma$  è un coefficiente, espresso in  $\text{MK}^{-1}$  (quando CCT è espresso in Kelvin). Il valore di tale coefficiente, dedotto dagli autori a partire dalle misure è  $155.88 \cdot 10^6 \text{MK}^{-1}$  (CCT=6415K) con una deviazione standard di 7.48

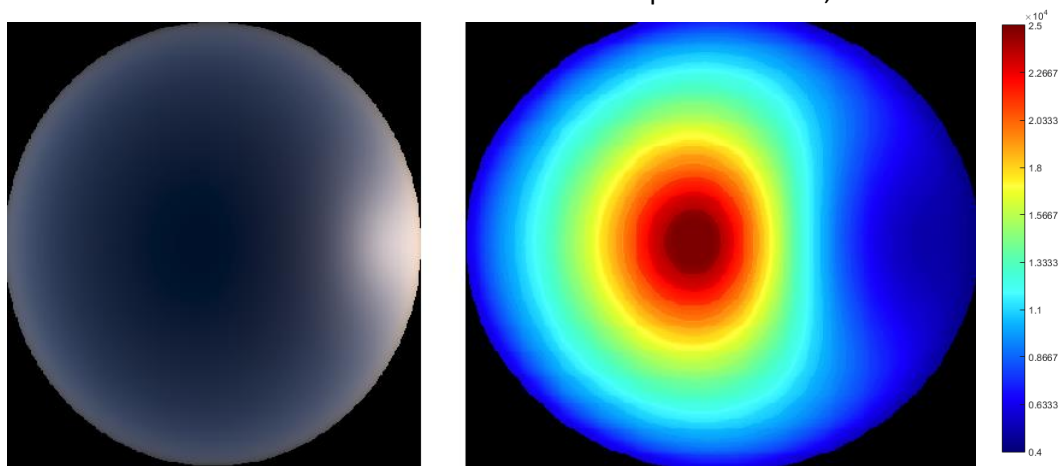


Altri modelli per la determinazione della temperatura di colore del cielo sono stati sviluppati per applicazioni di computer grafica<sup>3,4</sup>, per la rappresentazione foto-realistica di scene in ambienti esterni durante le ore diurne. Un esempio dei risultati ottenibili dall'implementazione di tali modelli è riportato alla Figura 6, dove è stata rappresentata un'immagine a bassa dinamica del cielo sereno di Milano al 20 Giugno alle ore 12.00 (l'algoritmo, nella implementazione da noi realizzata, genera infatti una mappa HDR della volta celeste e una corrispondente tabella/mappa a falsi colori di temperature correlate di colore).

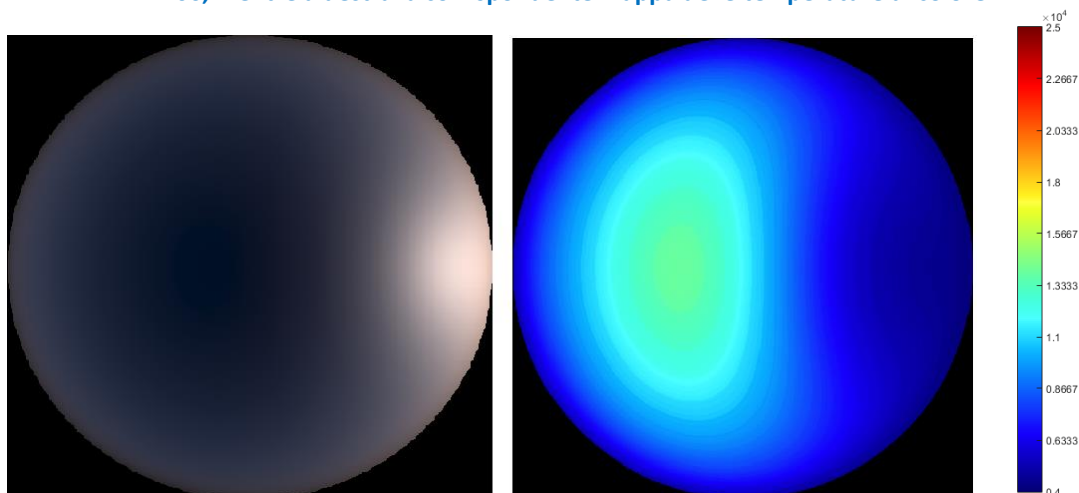


**Figura 6 - Immagine a bassa dinamica del cielo sereno di Milano il 20 Giugno alle ore 12.00**

Applicando il medesimo modello, è stato possibile determinare la distribuzione della temperatura di colore del cielo al 21 Dicembre alle ore 12.00 in condizione di cielo coperto e sereno, come mostrato alla Figura 7.



**Figura 7 - A sinistra è riportata l'immagine a bassa dinamica del cielo sereno di Milano il 21 Dicembre alle ore 12.00, mentre a destra la corrispondente mappa delle temperature di colore.**

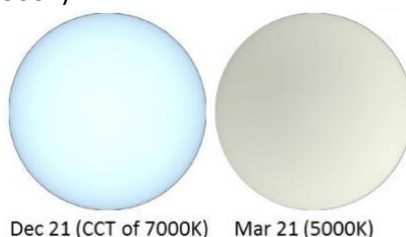


**Figura 8 - A sinistra è riportata l'immagine a bassa dinamica del cielo coperto di Milano il 21 Dicembre alle ore 12.00, mentre a destra la corrispondente mappa delle temperature di colore.**



Data l'impossibilità di validare tali modelli con misure sul campo, si è deciso di ricorrere ad una semplificazione della distribuzione della temperatura di colore sulla volta celeste, basandosi su quanto già fatto da altri autori che si sono occupati della valutazione dell'effetto circadiano dell'illuminazione naturale all'interno degli edifici.

Sono state simulate diverse condizioni di cielo (coperto/overcast, sereno/clear, intermedio/intermediate) che possono capitare durante il corso dell'anno e l'interposizione di una tenda diffondente chiara di fronte alla finestra nelle sole condizioni di illuminazione naturale sereno/clear e intermedio/intermediate durante le quattro stagioni considerate (Tabella 2). Sulla base della letteratura scientifica disponibile si è poi passati alla stima della temperatura correlata di colore media di una giornata in diverse condizioni di cielo. In particolare, applicando alcune semplificazioni e basandosi sulla letteratura relativa<sup>5,6,7</sup>, è stato determinato che un cielo intermedio/intermediate corrisponde ad un illuminante D55 (5500K), un cielo coperto/overcast con radiazione diffusa corrisponde ad un illuminante D65 (6500K), un cielo sereno/clear corrisponde ad un illuminante D75 (7500K).



**Figura 9 - Esempio di temperatura correlata di colore del cielo sereno in Inverno e cielo intermedio in Primavera<sup>8</sup>**

Questa distinzione risulta fondamentale nella determinazione dell'influenza della luce sulla regolazione o meno del sistema circadiano dato che, ad esempio, l'illuminante D75 ha una maggiore efficacia circadiana rispetto al D65 e al D55.

Paper	Sky State	m(CCT) (in MK <sup>-1</sup> )
Henderson and Hodgkiss <sup>1</sup>	North sky	165–180
	Total sky, no sun	145–150
	Total sky, with sun	170–175
Collins <sup>6</sup>	Skylight from four quadrants, total sky with sun	165–170
Winch <i>et al.</i> <sup>7</sup>	South sky	115–120, 160–165
	Total sky, no sun	130–135
	Total sky, with sun	170–175
Ando <i>et al.</i> (see Henderson <sup>20</sup> )	North sky, clear sky	95–100, 120–125
	North sky, cloudy, rain or snow	160–165
Tarrant <sup>11</sup>	North sky and south sky	150–160
Dixon <sup>14</sup>	Sunlight plus skylight:	
	Partial cloud with direct sun	177.5–182.5
	Partial cloud with obscured sun	162.5–167.5
	Overcast sky	167.5–172.5
	Clear sky	177.5–182.5
Present work	Hemispheric daylight (sunlight when present):	
	Clear sky	175–180
	Overcast sky	165–170
	Few clouds to mostly cloudy (i.e., all others)	175–180

**Figura 10 – Valori dell'intervallo dell'inversa CCT misurata in vari studi da vari ricercatori**

Un ulteriore approfondimento è stato eseguito considerando lo scenario tenda che consiste nell'aver considerato l'inserimento di un sistema di oscuranti classici per finestre al fine di schermare la luce diretta e

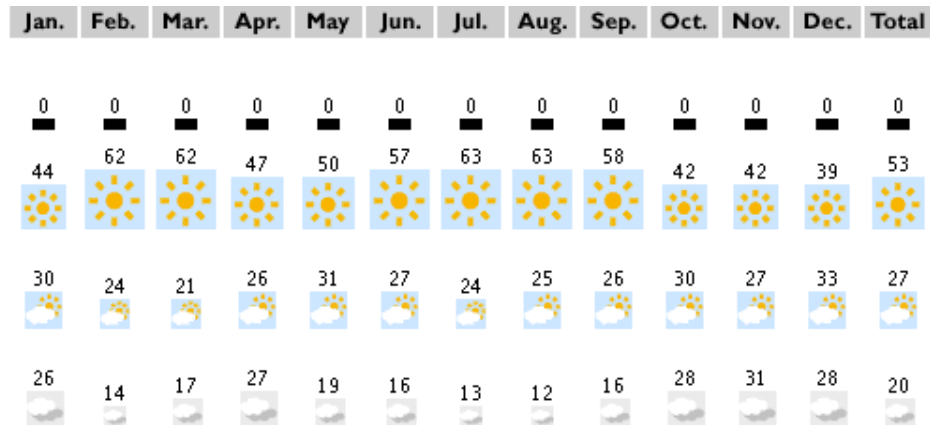
potenzialmente abbagliante, quindi non confortevole, per gli utenti. La simulazione della tenda all'interno del programma di calcolo è stata resa possibile sostituendo la finestra e la relativa distribuzione delle luminanze, determinata a sua volta dalla distribuzione spaziale delle luminanze della volta celeste, dalla località geografica, dall'orario e dalle caratteristiche geometriche dell'installazione, con un apparecchio di illuminazione di dimensioni uguali a quella della finestra e dotato di una opportuna distribuzione fotometrica<sup>1</sup>. Questo approccio, che potremmo definire "Metodo della sorgente sostitutiva" è ben descritto in letteratura, come ad esempio nel lavoro di Kobav et al<sup>9</sup>.

Tale scenario tenda è stato calcolato soltanto per le condizioni di cielo sereno/clear e intermedio/intermediate (Tabella 2), ovvero quelle situazioni in cui, elevati livelli di luce naturale diretta, potrebbero arrecare fastidio ad un osservatore posizionato nei punti di vista considerati per le varie attività (Cfr. Osservatore: caratteristiche ). Per il calcolo dell'illuminazione naturale mediata dall'interposizione di una tenda è stata effettuata un'approssimazione, avendo considerato il comportamento della luce naturale che filtra attraverso le fibre della tenda come diffondente in maniera lambertiana (ovvero senza componenti concentrate in alcuna direzione) e avendo ipotizzato, sia empiricamente, sia sulla base della letteratura corrente, un coefficiente di trasmissione del tessuto del valore di 0.3<sup>10</sup>.

**Tabella 2 - Condizioni del cielo e dell'illuminazione naturale valutate all'interno dei locali**

SCENARIO LUCE NATURALE: TIPI DI CIELO			SCENARIO TENDA	
CLEAR SERENO	INTERMEDIO INTERMEDIATE	COPERTO OVERCAST	CLEAR SERENO	INTERMEDIO INTERMEDIATE

Al fine di verificare l'effettivo impatto dell'illuminazione naturale sugli effetti non visivi della luce durante l'intero arco dell'anno per la latitudine e longitudine selezionata, è stata calcolata la frequenza delle diverse condizioni di cielo utilizzando dei dati statistici riferiti al periodo compreso tra il 1996 e il 2000. Tali dati satellitari, derivati dal database S@tel-Light<sup>11</sup>, informano sulla radiazione solare e la disponibilità di luce totale effettivamente avuta in Europa e nella specifica località considerata (Figura 11).



**Figura 11 – Informazioni sulle frequenze di condizioni di cielo sereno/clear, intermedio/intermediate e coperto/overcast nel periodo compreso tra il 1996 e il 2000 derivate dal database S@tel-Light**

**Tabella 3 – Determinazione delle condizioni di cielo nell'arco di un anno in località Milano (percentuale stagionale, percentuale totale e quantità di giorni)**

		GIORNI (gg)	%	SERENO (%)	SERENO (gg)	INTERMEDIO(%)	INTERMEDIO (gg)	COPERTO (%)	COPERTO (gg)
INVERNO	DICEMBRE	11	35	39	4.29	33	3.63	28	3.08
	GENNAIO	31	100	44	13.64	30	9.3	26	8.06
	FEBBRAIO	28	100	62	17.36	24	6.72	14	3.92
	MARZO	19	61	62	11.78	21	3.99	17	3.23
	TOTALE	89		52.9	47	26.6	24	20.6	18

<sup>1</sup> Si veda ad esempio Mark Spitzglas. Defining Daylighting from Windows in terms of candelpower distribution curves. IEE/Industry Applications Society 1984 Annual Meeting, Chicago IL, Sept. 30-Oct. 4, 1984

<b>PRIMAVERA</b>	MARZO	12	38.7	62	7.44	21	2.52	17	2.04
	APRILE	30	100	47	14.1	26	7.8	27	8.1
	MAGGIO	31	100	50	15.5	31	9.61	19	5.89
	GIUGNO	20	66.7	57	11.4	27	5.4	16	3.2
	<b>TOTALE</b>	<b>93</b>		<b>52.1</b>	<b>48.44</b>	<b>27.2</b>	<b>25.33</b>	<b>20.7</b>	<b>19.23</b>
<b>ESTATE</b>	GIUGNO	10	33.4	57	5.7	27	2.7	16	1.6
	LUGLIO	31	100	63	19.53	24	7.44	13	4.03
	AGOSTO	30	100	63	18.9	25	7.5	12	3.6
	SETTEMBRE	21	70	58	12.18	26	5.46	16	3.36
	<b>TOTALE</b>	<b>92</b>		<b>61.2</b>	<b>56.31</b>	<b>25.1</b>	<b>23.1</b>	<b>13.7</b>	<b>12.59</b>
<b>AUTUNNO</b>	SETTEMBRE	10	33.4	58	5.8	26	2.6	16	1.6
	OTTOBRE	31	100	42	13.02	30	9.3	28	8.68
	NOVEMBRE	30	100	42	12.6	27	8.1	31	9.3
	DICEMBRE	20	64.5	39	7.8	33	6.6	28	5.6
	<b>TOTALE</b>	<b>91</b>		<b>43.1</b>	<b>39.22</b>	<b>29.2</b>	<b>26.6</b>	<b>27.7</b>	<b>25.18</b>

Come si evince dalla Tabella 3, durante il corso dell'anno in località Milano (Latitudine 45.504044 Longitudine 9.177164) si hanno circa 191 giorni (media 52%) in condizioni di cielo sereno/clear, circa 99 giorni (media 27%) in condizioni di cielo intermedio/intermediate, circa 75 giorni (media 21%) in condizioni di cielo coperto/overcast. Questo calcolo approssimativo suggerisce che, per circa un quarto dell'anno e, prevalentemente nella stagione autunnale ed invernale, le condizioni del cielo sono coperto/overcast: in questo periodo dell'anno si ipotizza una diminuzione della quantità di luce all'interno dell'abitazione avendo, come conseguenza, una diminuzione sugli effetti circadiani non visivi della luce.

#### 1.1.4 Illuminazione artificiale

La simulazione è stata successivamente effettuata in condizioni di luce artificiale e in condizioni miste di luce artificiale e naturale per valutare l'efficacia di un sistema di illuminazione circadiano che possa soddisfare non solo le necessità di natura visiva ma avere anche degli effetti non visivi su un osservatore anziano.

**Tabella 4 – Scenari di illuminazione naturale e artificiale simulati per verificare l'effetto non visivo dell'illuminazione su un'utenza che invecchia**

SCENARIO	LUCE NATURALE	LUCE ARTIFICIALE	FUNZIONE
ALTERAZIONE CIRCADIANA	-	ILLUMINAZIONE TV + TABLET	Verificare l'effetto di disregolazione del sistema circadiano
REGOLAZIONE CIRCADIANA	21 DICEMBRE 2017 CIELO COPERTO/OVERCAST	ILLUMINAZIONE CIRCADIANA	Verificare l'effetto di regolazione del sistema circadiano

#### 1.1.5 Locali valutati

Gli spazi valutati sono stati i seguenti: il soggiorno/cucina, lo studio e la camera da letto, considerati come i locali più importanti in quanto gli utenti vi trascorrono la maggior parte del tempo. Diversamente non sono stati considerati il bagno, in quanto luogo in cui si staziona per un periodo limitato di tempo, e i luoghi di transito come il corridoio sia per le motivazioni di cui sopra sia perché, nello specifico esempio abitativo, di modesta entità. Sono stati inseriti i principali arredi presenti nei locali al fine di posizionare correttamente i punti di vista dell'osservatore per le diverse attività considerate e plausibili in un contesto domestico/residenziale.

Si è scelto di utilizzare un modello di simulazione virtuale sprovvisto dei materiali, delle texture e dei colori presenti nella realtà dell'ambiente fisico reale. È stato dunque utilizzato un materiale grigio acromatico in cui variano i coefficienti di riflessione, come da normativa, per pareti (0.5), soffitto (0.7) e pavimento (0.2). Per gli arredi è stato considerato un grigio acromatico con un coefficiente di riflessione compreso tra 0.5 e

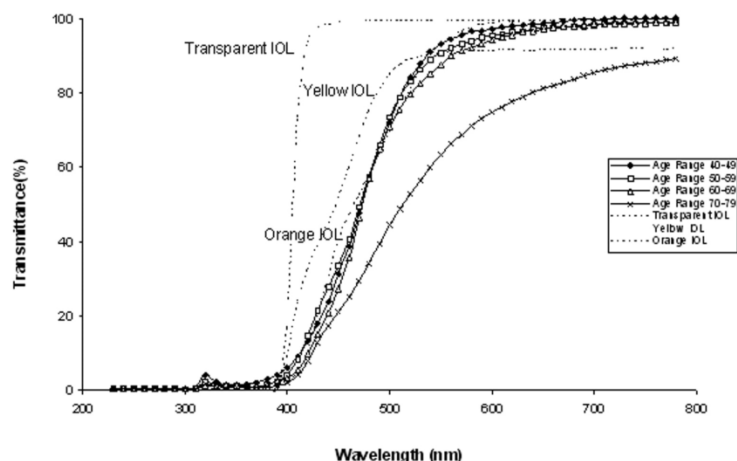
0.7. L'utilizzo di materiali grigi acromatici e di una sorgente con spettro equi-energetico rappresenta una conveniente semplificazione rispetto a modelli in cui si sono utilizzati materiali con colori diversi e approssimazioni più sofisticate della distribuzione spettrale della luce naturale (9 bande o 3 Bande)<sup>12</sup>.



**Figura 12 – Spazi valutati nella simulazione dell'illuminazione naturale e artificiale sugli effetti non-visivi**

#### 1.1.6 Osservatore: caratteristiche

Al fine di valutare gli effetti dell'illuminazione, sia naturale che artificiale, sull'individuo in termini di regolazione del sistema circadiano, si è reso necessario focalizzare l'attenzione sul sistema visivo di una popolazione che invecchia, considerando come utenti anziani un gruppo eterogeneo di soggetti che hanno più di 60 anni di età, ovvero tenendo in considerazione un limite di età che non necessariamente rispecchia un cambiamento nelle attività e nei ruoli sociali dell'individuo (ad esempio il pensionamento) ma che attiene ai cambiamenti fisiologici del sistema visivo umano. Infatti, a 60 anni si evidenziano una serie di cambiamenti fisici che interessano la vista che diminuisce sviluppandosi notevolmente la presbiopia e la frequenza di operazioni alla cataratta. È un dato ormai accertato che il cristallino umano tenda ad ingiallire con l'avanzare dell'età modificando in maniera notevole la trasmissione spettrale totale della luce visibile: la lente filtra gli UV e le corte lunghezze d'onda dello spettro, causando una notevole diminuzione della luce visibile, soprattutto dopo l'età di 70 anni. Sebbene i cristallini di adulti e persone anziane mostrino una grande variabilità nelle trasmissioni spettrali, in Figura 13 si riportano le curve di trasmissione spettrale medie del cristallino per gruppi di utenti raggruppati in quattro range di età (40–49, 50–59, 60–69, and 70–79) e delle principali lenti intraoculari utilizzate nelle operazioni di trapianto in casi di cataratta.



**Figura 13 – Curve di trasmissione spettrale del cristallino di gruppi di utenti raggruppati in quattro range di età (40–49, 50–59, 60–69, and 70–79) e delle principali lenti intraoculari utilizzate nelle operazioni di trapianto** <sup>13</sup>

Da questo grafico (Figura 13) si evince che la trasmissione spettrale del cristallino umano di età compresa tra 40 e 69 anni è praticamente la stessa, e quindi in sostanza è indipendente dall'età, mentre dopo i 70 anni di solito si registra una grave riduzione nella trasmissione spettrale. Infine nello stesso grafico si riporta la trasmissione spettrale di tre tipologie di lenti artificiali intraoculari: trasparente, con filtro giallo e con filtro arancione. Per questo studio è stata selezionata la lente intraoculare con filtro giallo (ad esempio Alcon Acrysof IQ SN60) e dunque la sua corrispondente trasmissione spettrale al fine di calcolare l'effettiva quantità (89%) e composizione spettrale di luce che viene captata dall'occhio umano di una persona con età avanzata che sia stata operata alla cataratta. Infatti, in base ai dati riferiti dai produttori, questa lente imita la trasmissione spettrale del cristallino umano, proteggendo dalla luce UV e dalle corte lunghezze d'onda potenzialmente dannose per la macula.

L'utente anziano è dunque caratterizzato da cambiamenti fisiologici che determinano una minore quantità di luce che raggiunge la parte posteriore dell'occhio, da cambiamenti neurali derivati dalla riduzione del numero di neuroni nella retina e nel nucleo soprachiasmatico (SCN), da cambiamenti di stile di vita e alcune limitazioni a livello motorio che determinano maggiore sedentarietà e ridotte attività.

Tutti questi elementi determinano una diminuita sensibilità alla luce che spesso genera problemi al sistema circadiano in termini di problemi di insonnia, risvegli precoci al mattino e aumento della sonnolenza nel tardo pomeriggio, necessità di riposarsi durante il pomeriggio.

#### 1.1.7 Osservatore: punti di vista

Per ogni ambiente preso in considerazione nello studio sono stati determinati i punti di vista prevalenti in base alle funzioni e alle attività presunte all'interno dei locali e, conseguentemente, sono state selezionate le posizioni di testa/altezza/sguardo prevalenti dell'utente e quindi i punti di vista a cui misurare l'illuminamento verticale sull'occhio, utile a determinare gli effetti non visivi della luce. Nello specifico, nella stanza da letto/camera, sono stati analizzati i punti di vista di due osservatori posti sul letto in varie posizioni di osservazione al fine di considerare diverse attività quali l'osservazione della tv, la lettura di un libro su supporto cartaceo o su supporto digitale (tipo tablet), il riposo nelle varie fasi di addormentamento, fase di sonno e risveglio. Nella Tabella 5 e in Figura 14 si riportano i punti considerati nel locale stanza da letto.

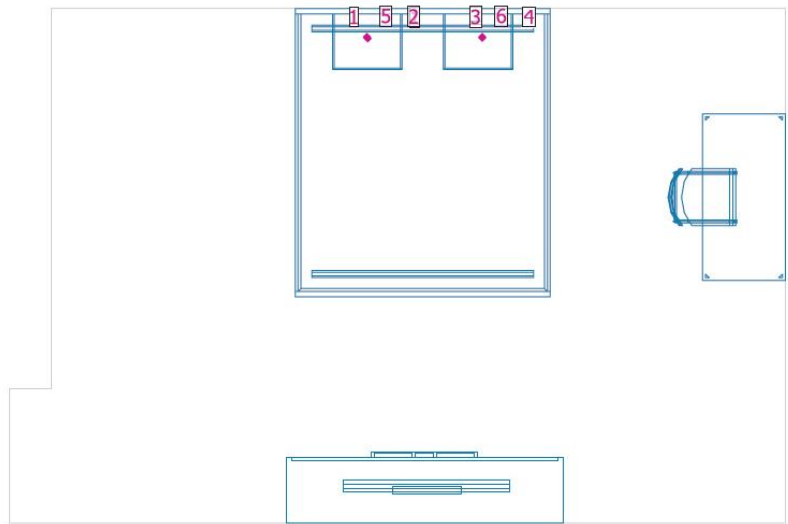


Figura 14 - Pianta della stanza da letto con indicazioni dei punti di osservazione (codice) in cui è stato misurato l'illuminamento fotopico in diverse situazioni di luce naturale e artificiale.

Tabella 5 - Definizione delle funzioni, attività, momento, durata, posizione dell'osservatore con relativa altezza dell'occhio e orientamento dello sguardo riferiti alla pianta in Figura 14

LOCALE	FUNZIONE	ATTIVITÀ	MOMENTO	DURATA	POSIZIONE	ALTEZZA OCCHIO	SGUARDO	CODICE
STANZA DA LETTO	RIPOSO E RELAX	Guardare la tv	Ore 21.00	3.00 h	seduta	1.20	Frontale	1-3
		Leggere un libro	Ore 21.00	3.00 h	seduta	1.20	Inclinato 30°	5-6
		Leggere dal tablet	Ore 21.00	3.00 h	seduta	1.20	Inclinato 30°	5-6
		Dormire	Ore 23.00	8.00 h	distesa	0.7	Verso l'alto	2-4
		Addormentarsi	Ore 23.00	10 min.	distesa	0.7	Verso l'alto	2-4
		Svegliarsi	Ore 07.00	10 min.	distesa	0.7	Verso l'alto	2-4

Nel soggiorno cucina, diversamente, sono stati analizzati i punti di vista di diversi osservatori collocati in varie situazioni della stanza divise tra attività statiche (tavolo, divano/poltrona) e attività dinamiche (piani di lavoro della cucina) in varie posizioni di osservazione al fine di considerare diverse attività quali la preparazione del cibo (lavaggio, manipolazione, cottura), il consumo delle pietanze cucinate, la lettura di un libro su supporto cartaceo o su supporto digitale (tipo tablet), le attività di lavoro/focalizzazione e concentrazione al tavolo oppure attività di relax e conversazione comodamente seduti. Nella Figura 15 e in Tabella 6 si riportano i vari punti considerati nel locale soggiorno/cucina.

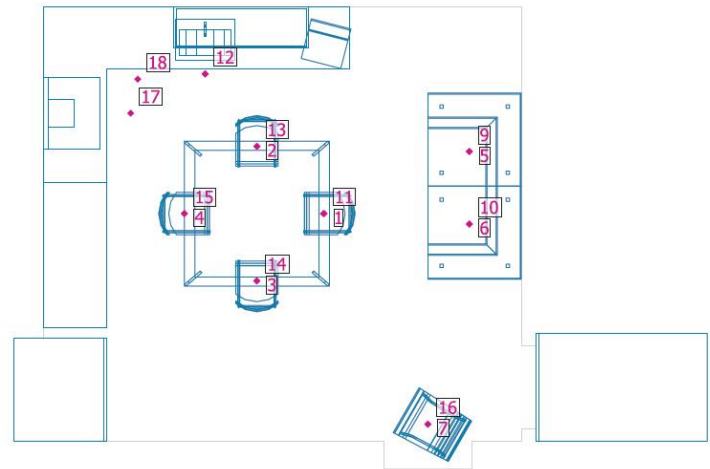
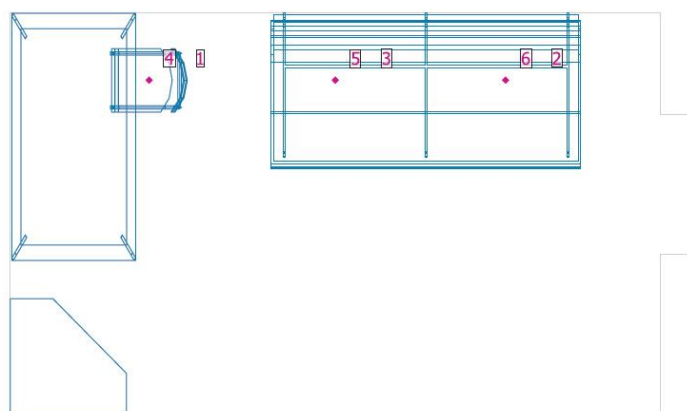


Figura 15 - Pianta del soggiorno/cucina con indicazioni dei punti di osservazione (codice) in cui è stato misurato l'illuminamento fotopico in diverse situazioni di luce naturale e artificiale.

**Tabella 6 - Definizione delle funzioni, attività, momento, durata, posizione dell'osservatore con relativa altezza dell'occhio e orientamento dello sguardo riferiti alla pianta in Figura 15**

LOCALE	FUNZIONE	ATTIVITÀ	MOMENTO	DURATA	POSIZIONE	ALTEZZA OCCHIO	SGUARDO	CODICE
SOGGIORNO CUCINA	PREPARAZIONE DEL CIBO	Cuocere	Ore 7.00 Ore 12.00 Ore 19.00	10min. 20min. 20min.	In piedi	1.70	Inclinato 30°	7
		Tagliare/pulire/manipolare	Ore 7.00 Ore 12.00 Ore 19.00	10min. 20min. 20min.	In piedi	1.70	Inclinato 30°	18-12
		Lavare	Ore 7.00 Ore 12.00 Ore 19.00	10min. 10min. 10min.	In piedi	1.70	Inclinato 30°	12
	CONSUMO DEL CIBO	Mangiare	Ore 7.00 Ore 12.00 Ore 19.00	20min. 30min. 30min.	seduto	1.20	Frontale e inclinato 30°	1-2-3-4-11-13-14-15
	LAVORO	Manipolare oggetti	Ore 9.00 Ore 13.00	3.00 h 6.00 h	seduto	1.20	Inclinato 30°	1-2-3-4-11-13-14-15
	RIPOSO E RELAX	Leggere un libro	Ore 9.00 Ore 13.00	3.00 h 6.00 h	seduto	1.20	Inclinato 30°	9-10-16
		Conversare	Ore 9.00 Ore 13.00	3.00 h 6.00 h	seduto	1.20	frontale	5-6-7

Nello studio, infine, sono stati analizzati i punti di vista di diversi osservatori collocati in due situazioni della stanza (tavolo, divano/poltrona) in varie posizioni di osservazione al fine di considerare diverse attività quali la lettura di un libro su supporto cartaceo o su supporto digitale (tipo tablet), le attività di lavoro/focalizzazione e concentrazione al tavolo. Nella Figura 16 e in Tabella 7 si riportano i vari punti considerati nel locale studio.



**Figura 16 - Pianta dello studio con indicazioni dei punti di osservazione (codice) in cui è stato misurato l'illuminamento fotopico in diverse situazioni di luce naturale e artificiale.**

**Tabella 7 - Definizione delle funzioni, attività, momento, durata, posizione dell'osservatore con relativa altezza dell'occhio e orientamento dello sguardo riferiti alla pianta in Tabella 7**

LOCALE	FUNZIONE	ATTIVITÀ	MOMENTO	DURATA	POSIZIONE	ALTEZZA OCCHIO	SGUARDO	CODICE
STUDIO	STUDIO – LAVORO	Leggere da monitor	Ore 9.00; Ore 13	3.00 h 6.00 h	seduta	1.20	frontale	1
		Manipolare oggetti	Ore 9.00; Ore 13	3.00 h 6.00 h	seduta	1.20	Inclinato 30°	4
	LETTURA	Leggere un libro	Ore 9.00; Ore 13	3.00 h 6.00 h	seduta	1.20	Frontale	2-3
		Leggere un libro	Ore 9.00; Ore 13	3.00 h 6.00 h	seduta	1.20	Inclinato 30°	5-6



### 1.1.8 Periodizzazione ed effetti circadiani

#### 1.1.8.1 Quantità e qualità

Il modello di sensibilità circadiana alla luce utilizzato per le simulazioni è quello proposto da Rea<sup>14,15</sup>: non ci sono ancora delle curve di sensibilità standardizzate (come la curva fotopica), ma sono disponibili solo i risultati di alcuni studi come ad esempio Gall (2004)<sup>16</sup>, Rea et al. (2005), e Lucas et al. (2014)<sup>17</sup>. Sulla base di tale modello è stato possibile determinare a quale valore di illuminamento fotopico una sorgente risulta equivalente ad un'altra con diversa distribuzione spettrale.

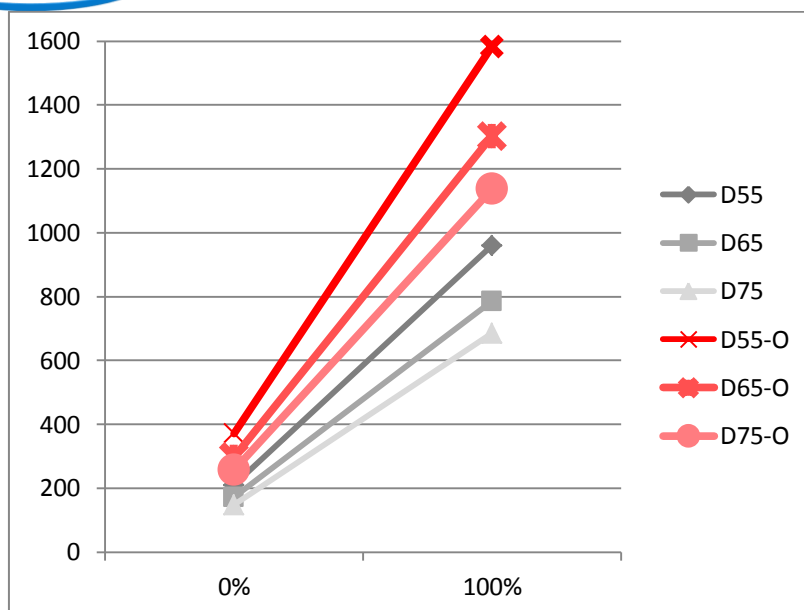
Diversi studi di ricerca dimostrano che la risposta circadiana (ad esempio nella soppressione notturna della melatonina) si avvicina a livelli massimi dopo un periodo di esposizione a luce bianca a 300lux compreso tra 0,5 ore a 1,5 ore (Cajochen et al, 2000)<sup>18</sup>. Maggiore durata dell'esposizione (6,5hr) determina la saturazione della risposta circadiana con soli 200lux alla cornea (Zeitler et al., 2000)<sup>19</sup>. La ricerca suggerisce anche che 100lx alla cornea possono produrre una risposta del 50%, mentre 600-1000 lx possono saturare il sistema (Zeitler et al., 2000). I numeri di cui sopra sono valori fotopici in lux generati da un particolare spettro di luce. Pertanto, al variare dello spettro, dovranno essere calcolate le opportune equivalenze circadiano-lux in modo da garantire lo stesso livello di stimolazione.

Nella presente relazione sono state considerate le soglie riferite all'illuminante D55, già utilizzate in precedenti lavori<sup>20</sup>, dalle quali sono stati calcolati i livelli di illuminamento corrispondenti alla soglia minima e massima relativi ad altre distribuzioni spettrali (D65 e D75). Per il calcolo di tali equivalenze, è stato utilizzato il modello proposto da Rea et al., dopo avere valutato che la differenza nelle soglie valutate con altri modelli di sensibilità circadiana erano contenute entro valori accettabili.

Tenendo conto delle incertezze note nella modellazione degli effetti non visibili della luce, una semplice funzione a rampa può essere proposta come modello ragionevole per rappresentare la probabilità che l'illuminamento verticale in un punto, protratta per un tempo sufficiente e secondo una determinata direzione d'osservazione sia sufficiente per influenzare il sistema circadiano: bassa probabilità (0%) al di sotto del limite inferiore, e alta probabilità (100%) al di sopra limite superiore, con un'interpolazione lineare tra questi valori.

Sebbene dunque il modello proposto sia un'approssimazione, essendo questo un tema di ricerca aperto, al momento è l'unica possibilità per ipotizzare il comportamento dell'organismo in relazione agli effetti non visivi della luce. Ulteriori dati sperimentali e ricerche in ambito reale e non solo laboratoriale, sarebbero necessari per ottenere dei dati e protocolli più specifici.

Ai fini di questa ricerca, sono stati calcolati i valori di soglia di illuminamento utili a determinare gli stessi effetti non visivi ("equivalente al circadiano") per le tre diverse sorgenti di illuminazione (con diversa distribuzione spettrale) che rappresentano le tre condizioni di cielo: intermedio/intermediate (D55), coperto/overcast (D65), sereno/clear (D75). Oltre a questo sono stati calcolati i valori di soglia di illuminamento considerando un osservatore anziano (D55-0; D65-0; D75-0). Infatti, tenuto conto dell'ingiallimento del cristallino e l'assorbimento delle corte lunghezze d'onda dello spettro, l'occhio di un anziano tende a modificare la percezione della temperatura di colore di una luce bianca diminuendola: ad esempio, la temperatura di colore di 7500K sarà percepita come di 5472K, una CCT di 6500K sarà percepita di 5050K, una CCT di 5500K sarà percepita di 4553K.



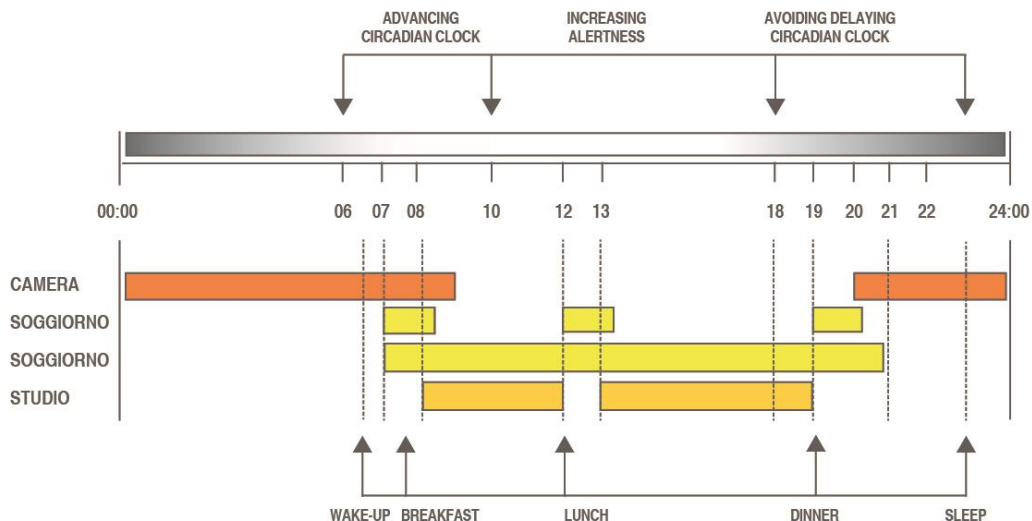
**Figura 17 – Comparazione tra i valori di Soglia relativi all’illuminamento all’occhio utili per l’attivazione circadiana per un utente normale in diverse condizioni di illuminazione (D55, D65, D75) e per un utente anziano (D55-O, D65-O, D75-O)**

In Figura 17, sono riportati i valori di soglia relativi all’illuminamento misurato all’occhio di una persona con età compresa tra i 23 e 69 e una persona anziana (dai 70 anni in poi) considerando una trasmissione del cristallino ridotta o comunque definita dalla lente intraoculare post operazione alla cataratta. I valori di soglia utilizzati nel presente studio sono 372lux e 1584lux per l’osservatore anziano in condizione di cielo intermedio con una sorgente a 5500K (D55-O); 298lux e 1303lux per l’osservatore anziano in condizione di cielo coperto con una sorgente a 6500K (D65-O); 257lux e 1138lux per l’osservatore anziano in condizione di cielo sereno con una sorgente a 7500K (D75-O).

### 1.1.8.2 Momento dell’esposizione

Per ragioni di valutazione dell’illuminazione circadiana naturale e artificiale, la giornata è stata divisa in tre distinti periodi durante i quali si hanno diversi “effetti non-visivi” dell’illuminazione:

- Mattino (6:00 – 10:00)**  
 Periodo in cui l’illuminamento derivato quasi esclusivamente dalla luce naturale dovrebbe essere utile a sincronizzare l’orologio biologico circadiano e ad attivare la concentrazione e la produttività nella maggior parte delle persone.
- Metà mattina e pomeriggio (10:00–18:00)**  
 Periodo in cui elevati livelli di illuminazione (naturale e in alcuni casi con la somministrazione di luce artificiale di supporto) può aiutare ad aumentare il livello di allerta e di focalizzazione/concentrazione.
- Tardo pomeriggio e notte (18:00–6:00)**  
 Periodo in cui l’esposizione alla luce dovrebbe essere evitata in quanto potrebbe innescare la secrezione del cortisolo e diminuire la secrezione di melatonina e quindi determinare un’alterazione del sistema circadiano, ovvero desincronizzare il sistema rispetto al giorno solare.



**Figura 18 – Momenti di esposizione alla luce durante la giornata. Diagramma derivato da “A framework for predicting the non-visual effects of daylight – Part II: The simulation model”**

In Figura 18, si riporta la schematizzazione di un'intera giornata che tiene in considerazione i tre momenti in cui avviene l'esposizione alla luce e in cui si auspicano gli effetti non visivi richiesti rispetto all'attivazione o de-attivazione della secrezione di melatonina e quindi alla sincronizzazione del sistema circadiano. Questi momenti sono localizzati in ambienti diversi della casa principalmente in relazione alle maggiori attività svolte all'interno della stessa e definite dai ritmi sonno-veglia e dalle attività di colazione pranzo e cena che contribuiscono a cadenzare il ritmo della giornata. Questo diagramma sarà utile per definire il luogo in cui, plausibilmente, gli utenti si troveranno durante la giornata in relazione alle quantità di luce richieste per il sistema circadiano. Ovviamente tale schema dipende dal tipo di attività che si deve fare ed è stato strutturato per lo stile di vita di un anziano che ha una modesta/ridotta attività in ambienti esterni e un'elevata sedentarietà in ambiente domestico.

Da un'analisi delle abitudini comportamentali di alcuni soggetti intervistati, considerando le attività di una persona anziana nel primo mattino, si può considerare ad esempio il seguente organigramma della giornata tipo: risveglio al mattino nel pieno buio della propria camera da letto (con tapparelle chiuse), una successiva fase di risveglio più o meno prolungata in posizione seduta sul letto per riattivare la circolazione degli arti, un successivo breve passaggio in bagno per poi recarsi in soggiorno/cucina dove si avviano le attività di preparazione della colazione e consumo della stessa al tavolo. Questa attività è dunque seguita dalle operazioni di pulizia personale in bagno per un breve periodo di tempo per poi recarsi nuovamente in camera da letto dove avvengono le operazioni di vestizione in maniera più comoda (spesso utilizzando il letto per stare seduti durante queste attività).

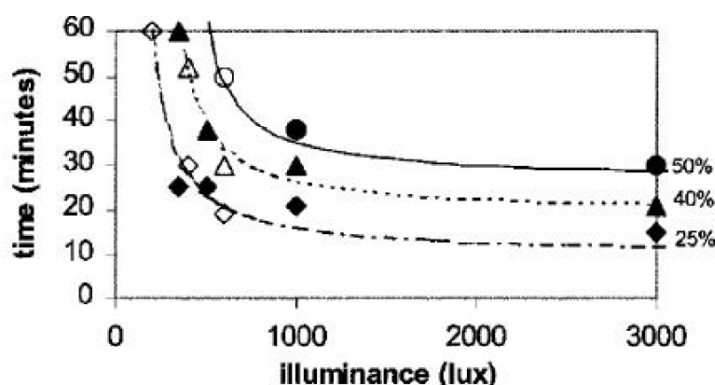
Le successive ore vengono trascorse in maniera più o meno distribuita nei vari locali della casa e dipendono da attività funzionali in base alle capacità e limitazioni del soggetto (come la preparazione e il consumo dei pasti, la pulizia della casa) e attività di rilassamento (lettura di un libro, guardare la tv, occuparsi dei propri hobbies, etc.).

Infine sul calar della sera, dopo la preparazione e consumo della cena, le attività si svolgono prevalentemente in soggiorno oppure in camera da letto, dove la maggior parte dei soggetti trascorrono il proprio tempo guardando la tv o leggendo un libro (sia su supporto cartaceo sia su supporto elettronico di tipo tablet).

### 1.1.8.3 Durata dell'esposizione

Per gli effetti non visivi sul sistema circadiano, è necessaria un'esposizione alla luce più prolungata rispetto a quella richiesta per la visione: il sistema circadiano opera infatti ad un ritmo molto più lento, soprattutto perché si basa sulla secrezione di ormoni nel sangue quali melatonina e cortisolo, non su processi neurali per comunicare ai vari sistemi del corpo. I risultati degli studi di McIntyre et al. (Figura 19) mostrano che maggiore è la quantità di illuminamento all'occhio, più veloce è la soppressione di melatonina nel sangue.

Il grafico riportato in Figura 19 mostra anche che per valori di illuminamento all'occhio superiori a 1000 lux la soppressione rimane più o meno costante e quindi non ha senso aumentare i livelli di illuminamento oltre questa soglia.



**Figura 19 - La quantità di tempo necessario per la soppressione della melatonina notturna umana in funzione dell'illuminamento forniti all'occhio<sup>21, 22, 23</sup>**

Il 25% della soppressione di melatonina si può ottenere nel tempo di 20 minuti con un illuminamento all'occhio di 1000 lux; diversamente se l'illuminamento scende al di sotto dei 500 lux sono necessari circa 60 minuti per ottenere la stessa soppressione di melatonina (25%). Al di sotto di un valore relativamente basso di circa 200 lux non si determinerà mai una soppressione della melatonina superiore al 25%. Sebbene questo sia un argomento dibattuto nel quale molta ricerca risulta ancora necessaria per determinare l'effettiva durata del trattamento di luce utile a sopprimere la secrezione di ormoni, Mark Rea conclude in approssimazione che, un'illuminazione somministrata al mattino con un livello di illuminamento alla cornea di circa 1000 lux e con una luce il cui spettro abbia un picco intorno ai 420-480 nm, la durata di esposizione debba essere di circa 1-2 ore per avere effetti sul sistema circadiano.

## 1.2 Risultati di simulazione dello scenario luce naturale (cielo coperto)

Rispetto al caso studio considerato, la condizione di cielo coperto si verifica durante il corso dell'anno per un tempo molto limitato (circa 21% dell'intero anno) e prevalentemente nella stagione autunnale ed invernale. Le simulazioni di luce naturale effettuate evidenziano la limitata quantità di illuminamento alla cornea che non risulta sufficiente per poter attivare la regolazione del sistema circadiano con la riduzione di secrezione di melatonina, soprattutto in queste due stagioni (inverno/autunno).

### 1.2.1 Stanza da letto (cielo coperto)

Analizzando i risultati ottenuti, a partire dal risveglio della mattina nel locale **stanza da letto** e considerando il periodo compreso tra le ore 6.00 e le ore 10.00, il livello di illuminamento all'occhio raggiunto è molto inferiore rispetto alla soglia utile per l'attivazione circadiana in tutte le stagioni considerate sia per un osservatore giovane (soglia 171 lux all'occhio) sia per un osservatore anziano (soglia 298 lux all'occhio) (Figura 21). Nonostante l'esposizione ad est della stanza, non risulta esserci una quantità di luce utile al mattino in condizioni di cielo coperto per settare l'orologio biologico degli individui in fase di risveglio. I soggetti sono stati considerati in posizione sdraiata o seduta sul letto, ipotizzando le diverse fasi di risveglio.

### 1.2.2 Soggiorno (cielo coperto)

Analizzando il periodo compreso tra le ore 10:00 e le ore 18:00 si è supposto che l'utente possa utilizzare la stanza studio o il soggiorno in maniera continua, passando del tempo nell'una o nell'altra per attività diverse. In queste due stanze sono necessari elevati livelli di illuminamento all'occhio nelle prime ore del mattino per stimolare il risveglio e la regolazione del sistema circadiano e anche nel primo pomeriggio per aumentare l'allerta e la concentrazione e posticipare la fase di addormentamento. Data l'esposizione del locale ad ovest e le condizioni di cielo coperto, il **soggiorno** durante il periodo (10-18) e nelle quattro stagioni considerate non risulta particolarmente luminoso e utile a livello circadiano per soggetti che vi abitano e si trovino nelle seguenti situazioni: seduti in poltrona, seduti sul divano e seduti al tavolo. L'unica posizione dell'occhio che risulta attivata nel periodo estivo in un orario compreso tra le ore 11.30 e le ore 17.00 è quella relativa al piano di lavoro della cucina, situazione in cui un osservatore si trova nel periodo di preparazione dei pasti (che comunque è un periodo molto limitato nel tempo). In questo caso specifico,

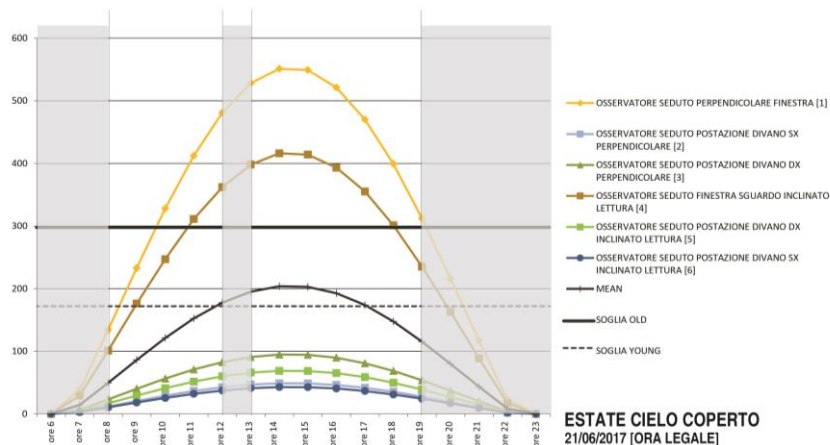
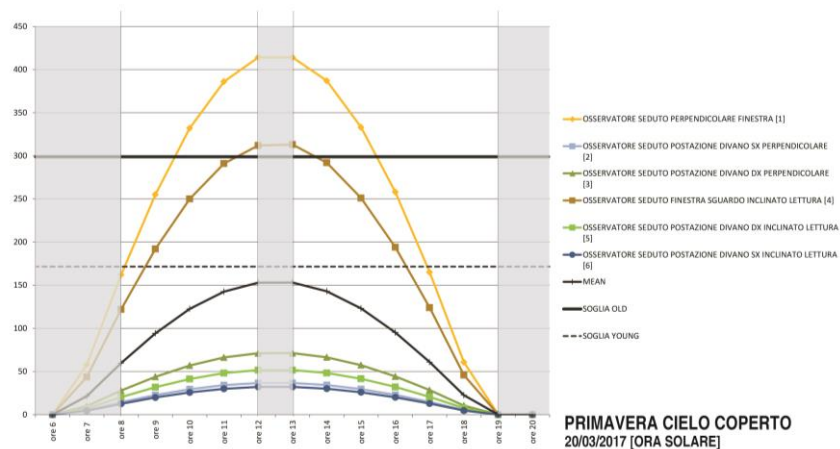
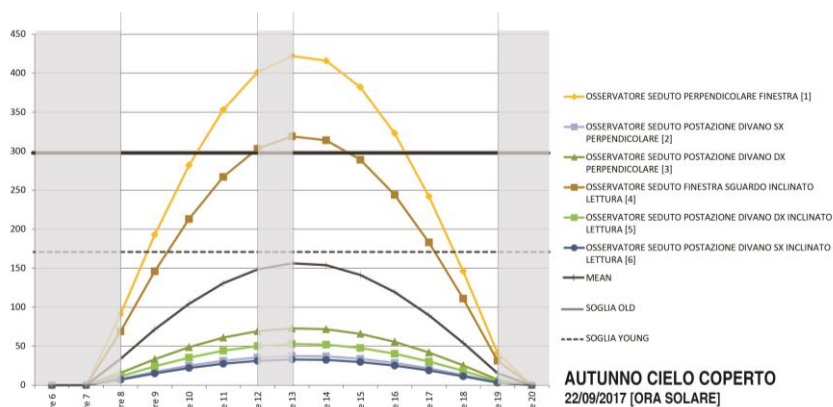
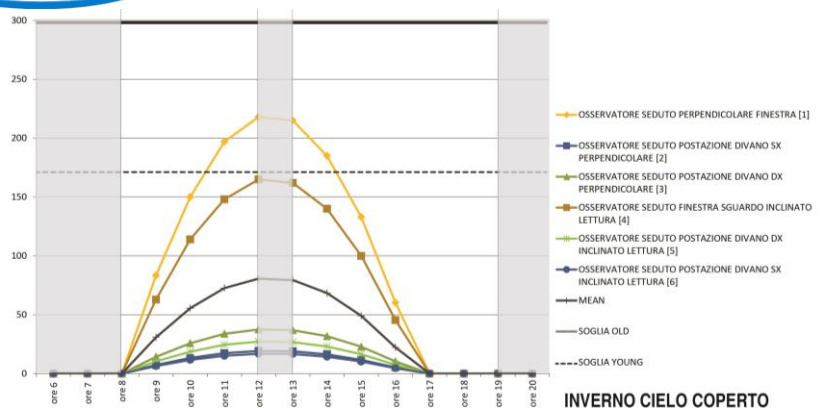
l'utente, sia giovane che anziano, risulterà attivato perché l'illuminamento sull'occhio risulta superiore al livello di soglia calcolato (Figura 20).

In base all'uso specifico della stanza e ai vari punti in cui un osservatore potrebbe essere posizionato per espletare diverse attività, e considerando anche che un soggetto tende a muoversi in diverse posizioni durante un periodo di tempo così lungo che comprende momenti di attività statiche e attività dinamiche, è stata calcolata la media di illuminamento alla cornea per tutte le posizioni dell'occhio considerate nella stanza. Tale valore medio non risulta essere mai più alto della soglia utile per ottenere un'attivazione circadiana sia in osservatori giovani sia in osservatori anziani durante tutto il periodo dell'anno in condizioni di cielo coperto (Figura 20).

### 1.2.3 Studio (cielo coperto)

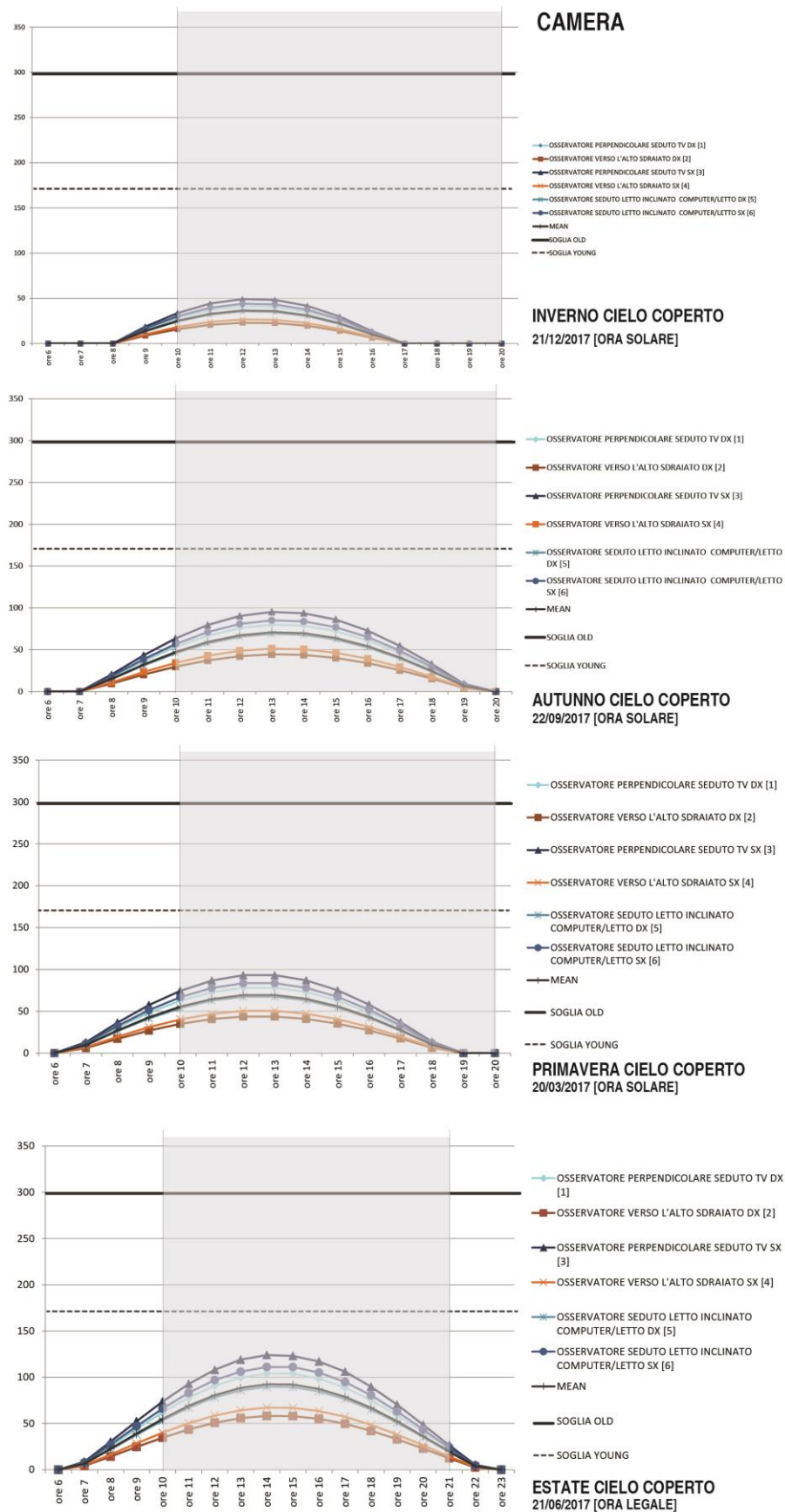
Per quanto concerne lo stesso periodo di tempo (10.00-18.00) trascorso nel **locale studio**, facendo eccezione per i momenti relativi alla preparazione e al consumo del pranzo (12-13), si evidenzia una forte stimolazione circadiana in condizioni di cielo coperto durante le stagioni primavera, autunno ed estate sia per un osservatore anziano sia per un osservatore giovane che sia posizionato frontalmente alla finestra, ovvero seduto alla scrivania con sguardo perpendicolare e/o inclinato verso il piano di lavoro (1.2m altezza da terra). Tale posizione, risulta quella migliore da un punto di vista di attivazione del sistema circadiano in un orario compreso tra le ore 9.30/10.00 e le ore 15.30/16.00 durante tutte le stagioni ad eccezione dell'inverno (Figura 20).

Diversamente, se si considerano le altre posizioni dell'utente seduto al divano nella parte più interna della stanza in attività di lettura o relax, le condizioni di illuminamento all'occhio variano notevolmente rispetto alla postazione alla scrivania. Il livello di illuminamento risulta sempre inferiore alla soglia, sia per un osservatore giovane sia anziano, ovvero non utile ad attivare il sistema circadiano e rendere il soggetto più concentrato, sveglio e attento. L'illuminamento alla cornea non supera mai il valore di soglia durante le quattro stagioni considerate in condizioni di cielo coperto (Figura 20).



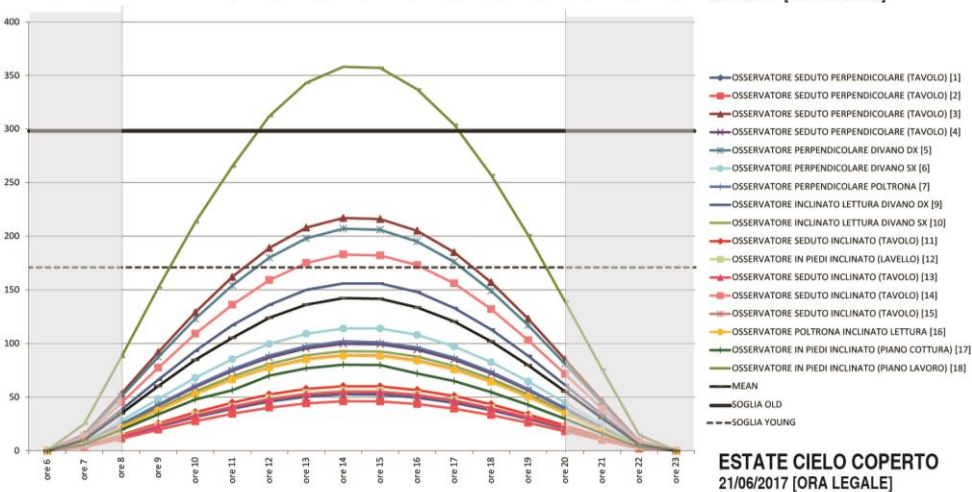
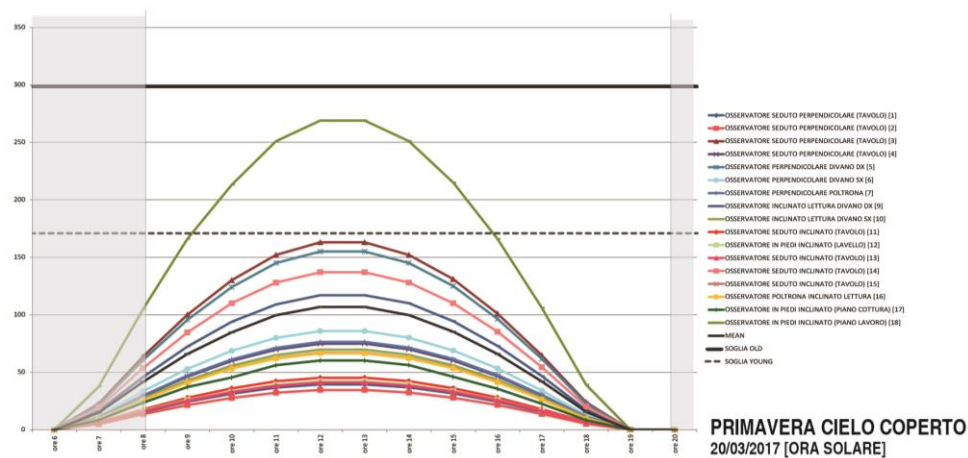
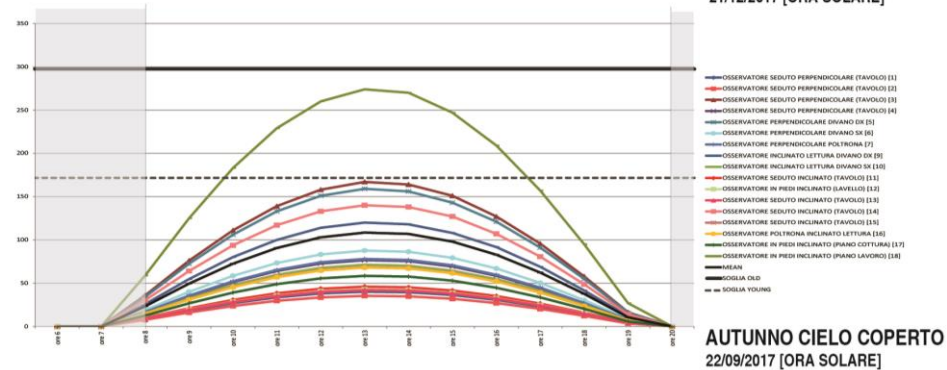
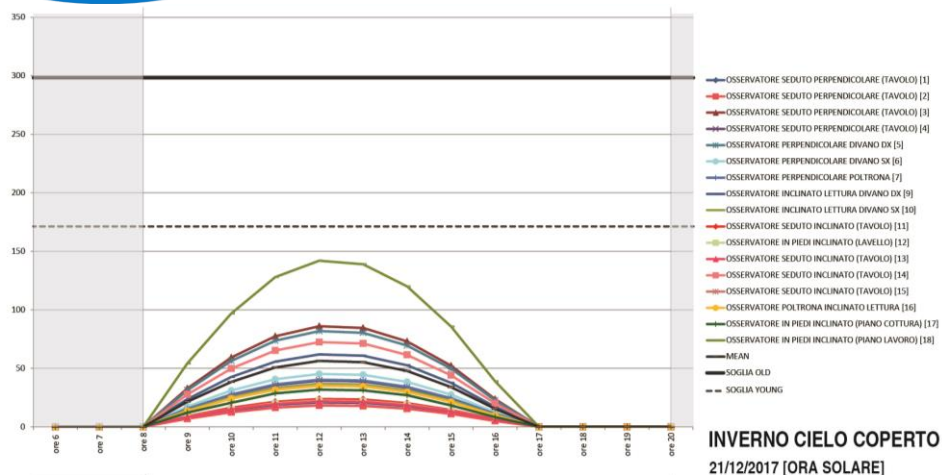
**Figura 20 – Risultati di simulazione per l'illuminamento all'occhio nella stanza Studio in condizioni di cielo coperto**





**Figura 21 - Risultati di simulazione per l'illuminamento all'occhio nella stanza da letto in condizioni di cielo coperto**





**Figura 22 - Risultati di simulazione per l'illuminamento all'occhio nel soggiorno in condizioni di cielo coperto**

### 1.3 Risultati di simulazione dello scenario luce naturale (cielo sereno) con o senza tenda

La condizione di cielo sereno si verifica, per la latitudine selezionata, per una durata approssimativa di circa 191 giorni che vuol dire che, per metà anno (52%) si ha un cielo sereno e la possibilità di ingresso di luce naturale negli interni con finestrature ben progettate. Per limitare l'abbagliamento da visione diretta della luce naturale in situazioni specifiche in cui l'osservatore anziano sia investito da luce diretta sul cristallino che limiti la capacità di vedere a causa dello scattering dello stesso, la simulazione di illuminazione naturale in condizioni di cielo sereno è stata effettuata inserendo un tendaggio frontalmente alle finestre in quegli orari in cui il sole risulta generare condizioni di luce non confortevoli. Diversamente in altre situazioni (come ad esempio nel locale camera) la tenda non è stata inserita dato che si presume che, in quello specifico orario, gli osservatori, anziano e giovane, si trovino in un'altra stanza e in attività diversa rispetto allo stare seduti o supini a letto.

#### 1.3.1 Stanza da letto (cielo sereno)

Analizzando i risultati ottenuti, a partire dal risveglio della mattina nel locale **stanza da letto** e considerando il periodo compreso tra le ore 6.00 e le ore 10.00, il livello di illuminamento all'occhio raggiunto risulta pienamente soddisfare l'attivazione circadiana nelle stagioni primavera ed autunno. In particolare, si registra un elevato illuminamento sulla cornea (comunque superiore alla soglia di attivazione circadiana di 171lux all'occhio per un osservatore giovane e 298lux all'occhio per un osservatore anziano) dalle ore 8.00 alle ore 10.00 del mattino in posizione sia seduta sul letto che sdraiata.

Diversamente, nella stagione invernale, il livello di illuminamento alla cornea non raggiunge livelli di attivazione circadiana se non per un periodo di tempo limitato, dalle ore 9.00 alle ore 10.00 per le posizioni di osservatori seduti e sdraiati (Figura 23). Un risveglio precedente a questo orario risulta quindi necessitare di maggiore illuminazione (artificiale) per poter attivare il sistema circadiano.

Nella stagione estiva, il livello di soglia si attiva dalle ore 8.00 alle ore 10.00 soltanto per la posizione seduta degli osservatori, mentre non è sufficiente per la posizione degli osservatori sdraiata.

#### 1.3.2 Studio (cielo sereno)

Per quanto concerne il periodo di tempo compreso tra le 10.00 e le 12.00, e dalle 13.00 e le ore 18.00, trascorso nel locale studio, si evidenzia una forte stimolazione circadiana in condizioni di cielo sereno durante le stagioni primavera (10-12;15-18), autunno (10-12;15-18) ed estate (10-12;13-18), sia per un osservatore anziano, sia per un osservatore giovane, soltanto relativamente alla posizione frontale alla finestra, ovvero rispetto ad un osservatore seduto alla scrivania con sguardo perpendicolare e o inclinato verso la superficie /piano di lavoro (1.2m altezza da terra). Tale posizione risulta quella migliore da un punto di vista di attivazione del sistema circadiano durante queste stagioni (Figura 24). Durante il periodo invernale, il periodo di attivazione circadiana dovuta all'illuminazione diretta della luce solare in tale posizione diminuisce ad un'ora e mezza in totale (11-12;13-13.30) e quindi questa stagione risulta necessitare di illuminazione aggiuntiva (artificiale) per poter aumentare la concentrazione, l'attenzione e l'allerta sia durante la prima mattina sia dopo pranzo.

Per tutte le altre posizioni dell'osservatore considerato in questo locale, l'illuminazione naturale durante tutte le stagioni (ad eccezione di un breve periodo estivo nelle ore pomeridiane) non risulta mai efficace nell'attivazione del sistema circadiano, ovvero, tramite la sola illuminazione naturale penetrata dalla finestra non si raggiungono i punti di osservazione più lontani dall'apertura in cui gli osservatori potrebbero sostare per attività di relax e lettura.

#### 1.3.3 Soggiorno (cielo sereno)

Un'analisi approfondita è stata fatta per lo stesso periodo di tempo tra le ore 10.00 e le 18.00 trascorso nel locale soggiorno, supponendo che l'utente possa utilizzare la stanza in diversi punti di osservazione, impegnato in varie attività che lo portano a stazionare continuamente in punti diversi. Per questo motivo, sono stati considerati sia i risultati di illuminamento ottenuti rispetto ai singoli punti di osservazione sia rispetto ad un dato aggregato che considera la media degli illuminamenti calcolati rispetto a tutti i punti di osservazione.

In condizioni di cielo sereno, data l'esposizione del locale ad ovest, il soggiorno durante il mattino, ovvero nel periodo tra le ore 10 e le ore 13 risulta generalmente non efficace a livello circadiano per soggetti che vi abitano e vi siano posizionati nelle seguenti situazioni: seduti in poltrona, seduti sul divano e seduti al

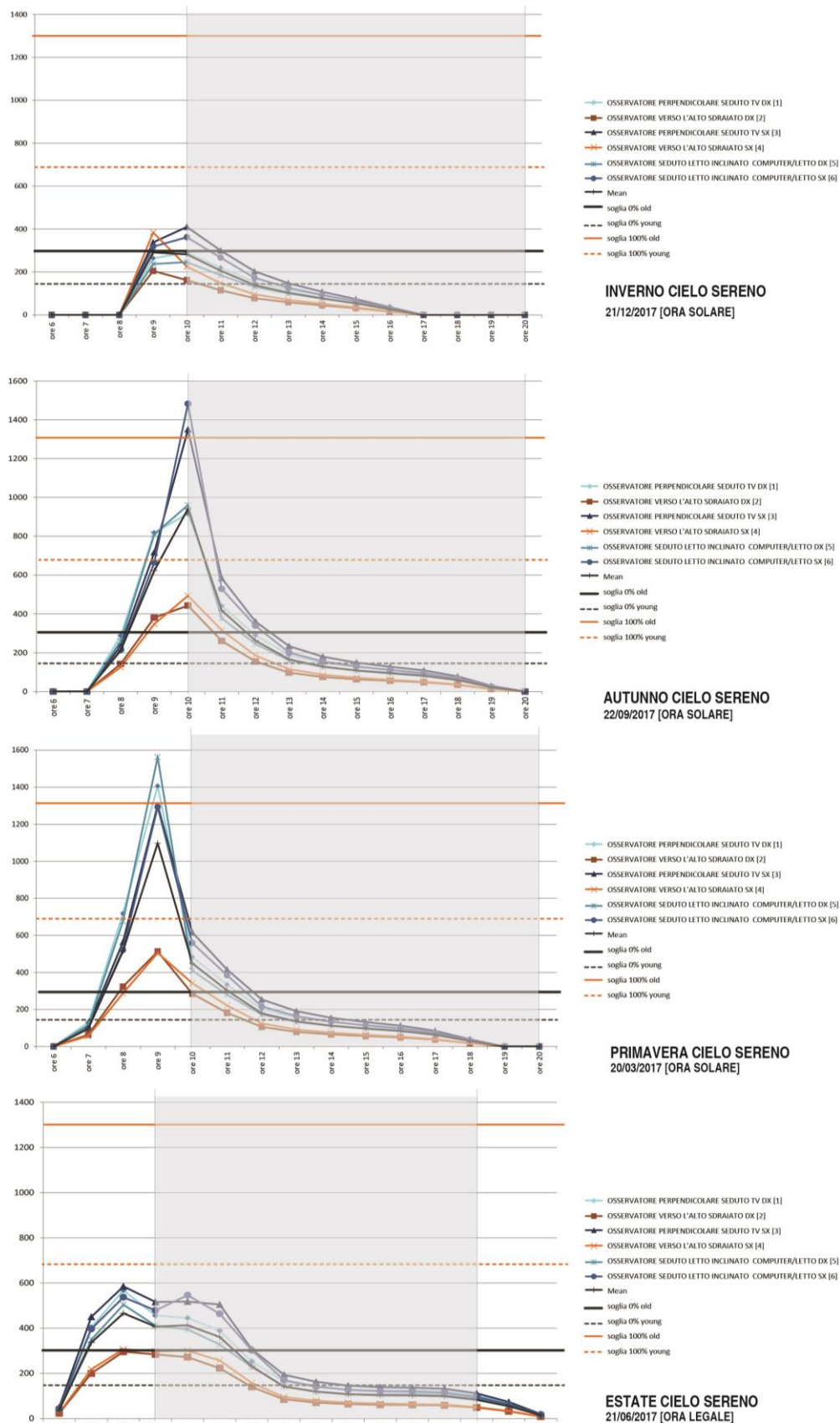
tavolo. Come per la condizione di cielo coperto, l'unica posizione dell'occhio di un osservatore anziano che risulta attivata al mattino durante le stagioni primavera, estate ed autunno è quella relativa ad un osservatore in piedi di fronte al piano di lavoro della cucina (e quindi alla finestra). Tale situazione di osservazione si assume in attività che si protraggono per un periodo limitato di tempo (inferiore ai 30 minuti) per poter efficacemente attivare il sistema circadiano (Figura 25).

Diversamente nella stagione invernale non si registra alcuna attivazione circadiana in alcun momento della giornata tenendo in considerazione una media di tutte le posizioni potenzialmente assunte sia da un osservatore anziano che da un osservatore giovane. Anche in condizioni di cielo sereno, dunque, la stagione invernale determina condizioni di illuminazione interne all'abitazione che non permettono la sincronizzazione circadiana (Figura 25).

Durante il primo e tardo pomeriggio, le condizioni luminose della stanza migliorano, determinando attivazione circadiana da più posizioni assunte da un osservatore anziano e soprattutto considerando anche la media delle posizioni potenzialmente assunte nella stanza. In particolare, nella stagione autunnale, si ha attivazione dell'osservatore posizionato di fronte al piano di lavoro della cucina e di coloro che sono seduti al tavolo orientati verso la finestratura più grande in un periodo compreso tra le 15-18. Se si considera la media delle possibili postazioni di un osservatore anziano, il periodo di attivazione circadiana risulta invece molto ridotto ma comunque ragionevolmente sufficiente per determinare attivazione circadiana (ore 16-17.30).

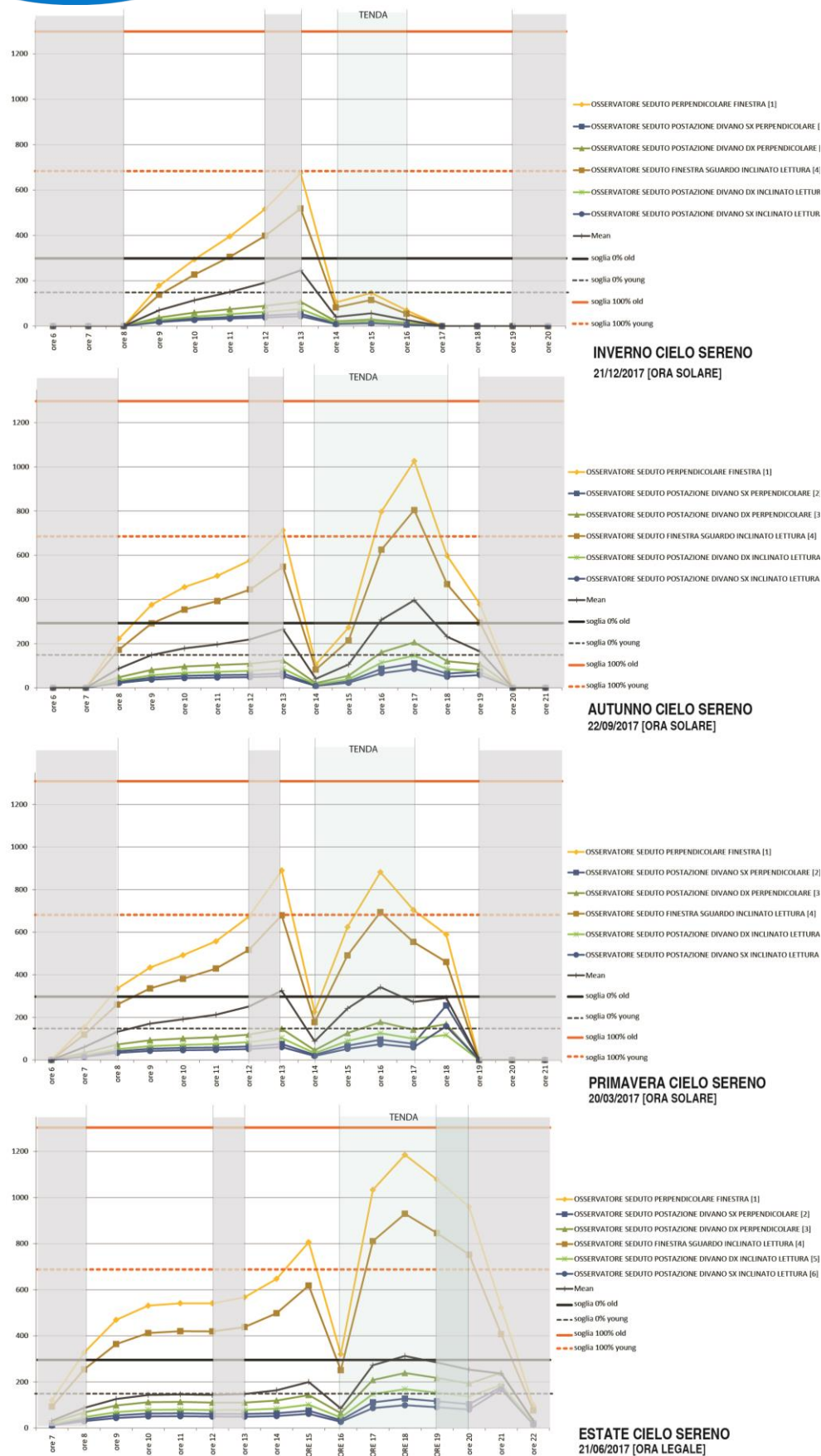
Simili risultati si ottengono nella stagione primaverile durante la quale si dilatano sia i tempi di possibile esposizione all'attivazione circadiana sia le postazioni dell'osservatore da cui ciò si rende possibile. Oltre alle postazioni dell'osservatore seduto al tavolo e frontale al piano di lavoro della cucina, l'attivazione si estende anche al divano e alla poltrona più lontana dalle finestre. Il periodo di possibile esposizione dunque diventa maggiore (ore 15.30 – 18.30).

Tale trend aumenta nella stagione estiva quando l'illuminazione naturale che penetra all'interno della stanza favorisce un'attivazione circadiana nella maggior parte dei punti di osservazione che fronteggiano le finestre. Dalle ore 16.30 alle ore 20.00, sostare all'interno della stanza soggiorno in vari punti considerati (calcolandone la media) determina attivazione per un osservatore anziano (Figura 25).



**Figura 23 - Risultati di simulazione per l'illuminamento all'occhio nella stanza da letto in condizioni di cielo sereno senza tenda**





**Figura 24 - Risultati di simulazione per l'illuminamento all'occhio nella stanza Studio in condizioni di cielo sereno con tenda**

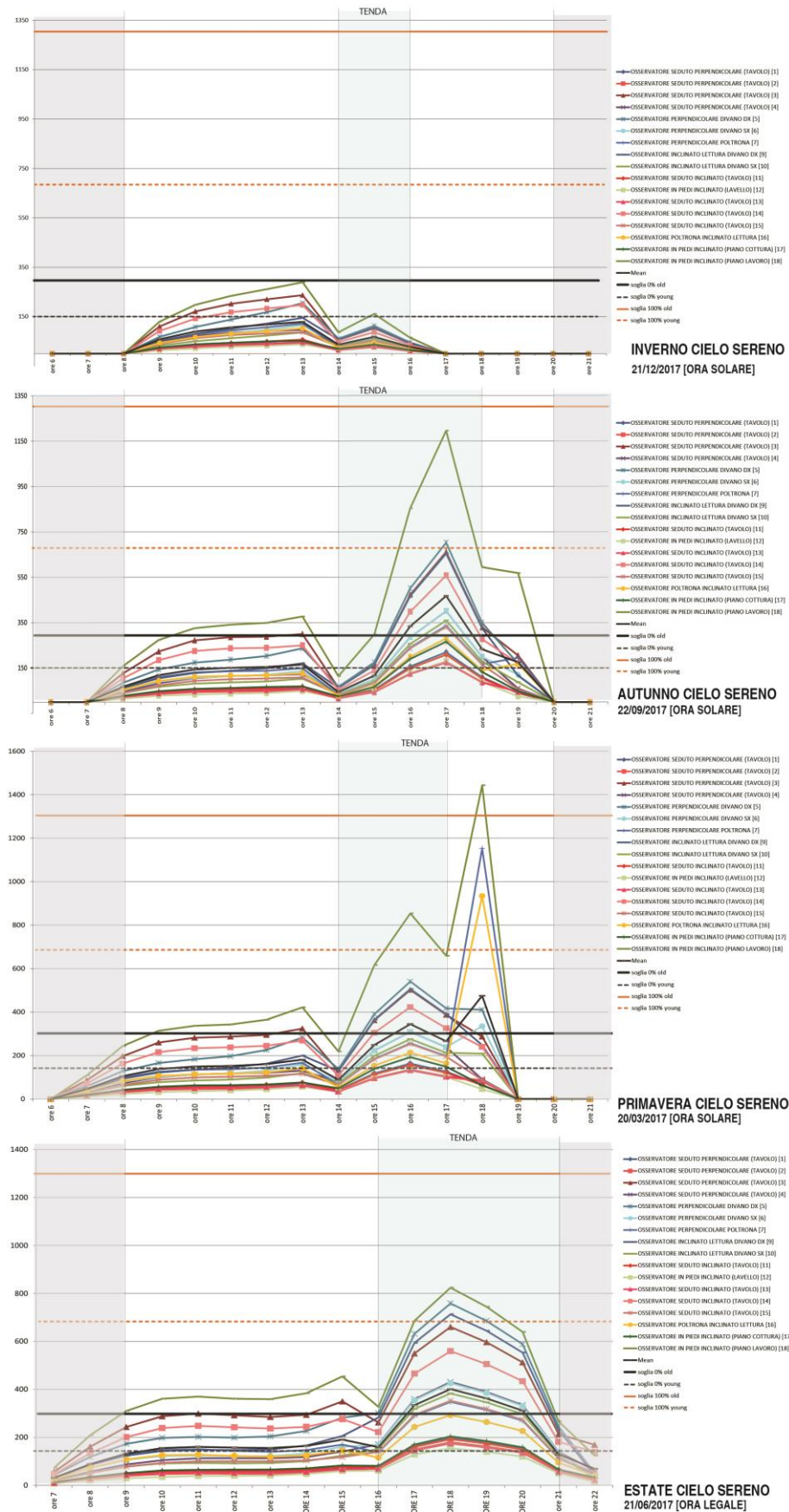


Figura 25 - Risultati di simulazione per l'illuminamento all'occhio nel soggiorno in condizioni di cielo sereno con tenda

## 1.4 Risultati di simulazione dello scenario luce naturale (cielo intermedio) con o senza tenda

La condizione di cielo intermedio si verifica, per la latitudine selezionata, per una durata approssimativa di circa 99 giorni cioè per un quarto dell'anno (27%). Per limitare l'abbagliamento da visione diretta della luce naturale in situazioni specifiche in cui l'osservatore anziano sia investito da luce diretta sul cristallino con limitata capacità di vedere a causa dello scattering dello stesso, anche la simulazione di illuminazione naturale in condizioni di cielo intermedio è stata effettuata inserendo un tendaggio frontalmente alle finestre e in quegli orari in cui il sole risulta generare condizioni di luce non confortevoli.

### 1.4.1 Stanza da letto (cielo intermedio)

Analizzando i risultati ottenuti, a partire dal risveglio della mattina nel locale **stanza da letto** e considerando il periodo compreso tra le ore 6.00 e le ore 10.00, il livello di illuminamento all'occhio raggiunto risulta soddisfare l'attivazione circadiana nelle stagioni primavera e autunno per le posizioni in cui l'osservatore risulta seduto sul letto. In particolare, si registra un elevato illuminamento sulla cornea (comunque superiore alla soglia di attivazione circadiana di 210lux all'occhio per un osservatore giovane e 372lux all'occhio per un osservatore anziano) dalle ore 9.00 alle ore 10.00 del mattino in autunno e dalle ore 8.00 alle ore 10.00 del mattino per la stagione primaverile. I risultati di queste simulazioni descrivono un'attivazione circadiana soltanto nella posizione seduta sul letto e non nella posizione sdraiata e quindi non particolarmente utili per attivazione del sistema circadiano nel momento del risveglio.

La stagione invernale, diversamente, non risulta contribuire efficacemente all'attivazione del sistema circadiano, ovvero i livelli di illuminamento raggiunti sulla cornea sono più bassi sia per un osservatore giovane che per un osservatore anziano (Figura 26). Diversamente, nella stagione estiva, il livello di illuminamento alla cornea non raggiunge livelli di attivazione circadiana se non per un periodo di tempo limitato per un osservatore anziano, ovvero dalle ore 9.30 alle ore 10.00 per le posizioni di osservatori seduti a letto (Figura 26). Un risveglio precedente a questo orario e una permanenza nella stanza da letto nelle prime ore del mattino risulta quindi necessitare di maggiore illuminazione (artificiale o naturale) per poter attivare il sistema circadiano.

### 1.4.2 Studio (cielo intermedio)

Il periodo di tempo 10.00-12.00 e 13.00-18.00 trascorso nel locale studio, risulta attivare efficacemente il sistema circadiano in condizioni di cielo intermedio durante le stagioni primavera (9-12; 13;15-16.30), autunno (10-12;13;16-17) ed estate (10-12;13-16;17-20) sia per un osservatore anziano sia per un osservatore giovane relativamente alla posizione frontale alla finestra. Tale posizione, assunta in attività di studio, lettura e lavoro al tavolo risulta quella migliore da un punto di vista di attivazione del sistema circadiano durante queste stagioni. (Figura 27). Durante la stagione invernale, il periodo di attivazione circadiana, derivato dal cielo intermedio nella posizione di studio alla scrivania frontale alla finestra, risulta diminuire a mezz'ora in totale (11.30-12;13) e quindi questa stagione risulta necessitare di illuminazione aggiuntiva (artificiale o naturale) per poter aumentare la concentrazione, l'attenzione e l'allerta sia durante la prima mattina sia dopo pranzo.

Per tutte le altre posizioni dell'osservatore considerato in questo locale, l'illuminazione naturale durante tutte le stagioni non risulta mai efficace nell'attivazione del sistema circadiano, sia per un osservatore anziano sia per un osservatore giovane (Figura 27).

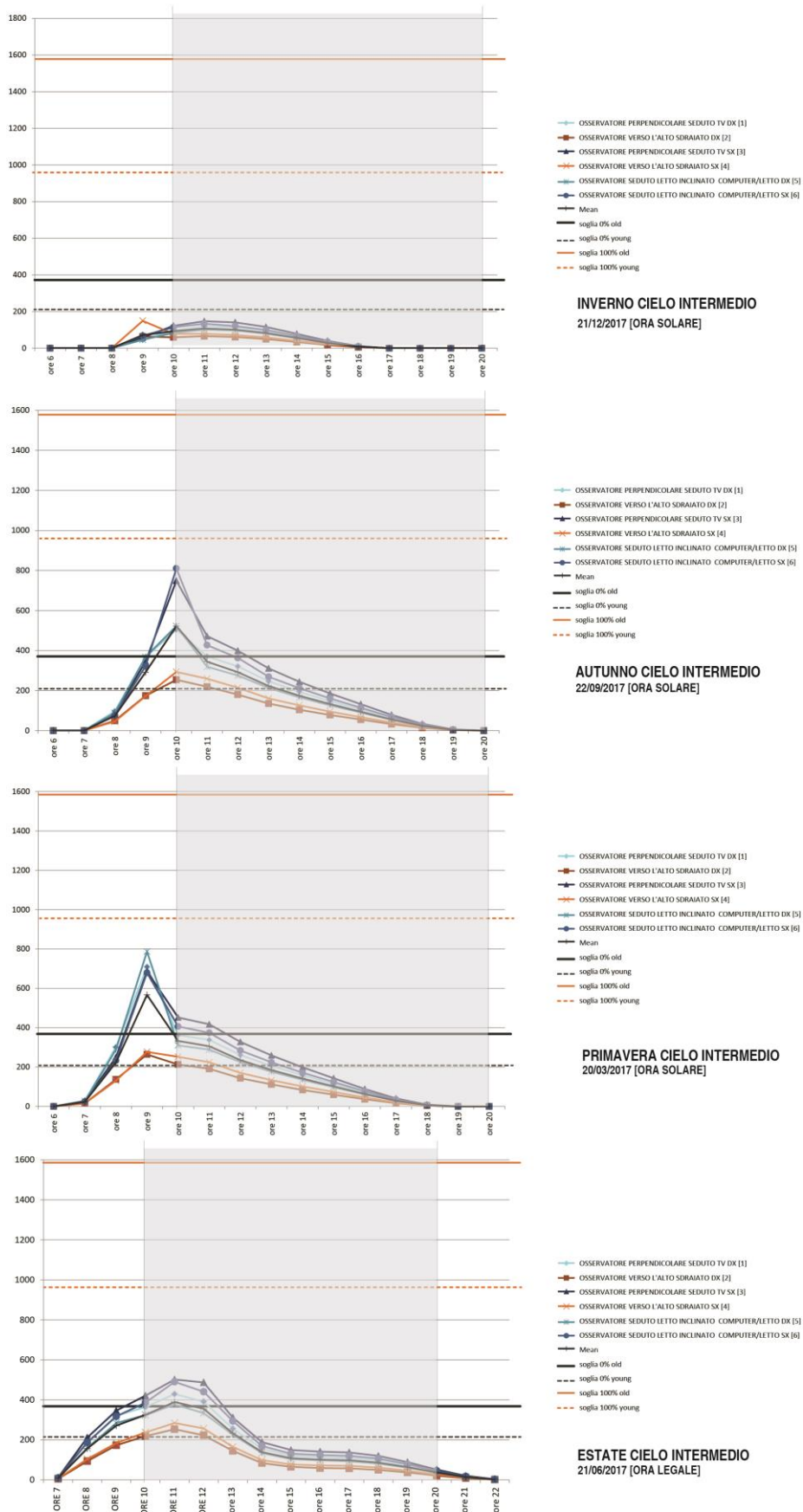
### 1.4.3 Soggiorno (cielo intermedio)

In condizioni di cielo intermedio, data l'esposizione del locale ad ovest, il soggiorno durante il mattino, ovvero nel periodo tra le ore 10.00 e le ore 13.00 risulta generalmente poco luminoso e non efficace a livello circadiano per soggetti che vi siano posizionati nelle seguenti situazioni: seduti in poltrona, seduti sul divano e seduti al tavolo. Come per la condizione di cielo coperto e sereno, l'unica posizione dell'occhio di un osservatore anziano che risulta attivata al mattino durante le stagioni primavera, estate ed autunno è quella relativa ad un osservatore in piedi di fronte al piano di lavoro della cucina (e quindi alla finestra), situazione in cui un osservatore si trova nel periodo di preparazione dei pasti, che comunque è un periodo molto limitato nel tempo (inferiore ai 30 minuti) per poter efficacemente attivare il sistema circadiano e la soppressione di melatonina nel sangue (Figura 28). In particolare, l'attivazione circadiana dell'osservatore anziano risulta avvenire nell'orario compreso tra le 11.30 e le 13.30 sia nella stagione autunnale che primaverile. Diversamente, nella stagione invernale, non si registra alcuna attivazione circadiana



considerando singolarmente i punti di osservazione per l'utente anziano. Anche in condizioni di cielo intermedio, come nelle condizioni di cielo coperto e sereno, dunque, la stagione invernale determina condizioni di illuminazione interne all'abitazione che non permettono la sincronizzazione con il sistema circadiano per un osservatore anziano (Figura 28).

Durante il primo e tardo pomeriggio (dalle 13.00 alle 18.00) le condizioni luminose della stanza migliorano nel senso che si prolunga nel tempo l'esposizione ad elevati livelli di illuminazione, determinando attivazione circadiana dalla posizione dei piani di lavoro della cucina. In particolare per quanto concerne l'autunno, considerando le media dei valori di illuminamento rilevato nelle diverse posizioni assunte da un osservatore anziano, si ha attivazione dell'osservatore posizionato di fronte al piano di lavoro della cucina in un periodo compreso tra le 15:30 e le 17:30. Se si considera un osservatore anziano nel periodo primaverile, il periodo di attivazione circadiana per la suddetta postazione di osservazione risulta invece leggermente ridotto ma comunque ragionevolmente sufficiente per determinare l'attivazione circadiana (ore 15-16.30; ore 18). In questa stagione inoltre, si osserva l'attivazione circadiana in ulteriori postazioni, come la posizione di un osservatore seduto sul divano e alla poltrona più lontana dalle finestre, questo determinando anche l'aumento del tempo di esposizione attivata per la media delle postazioni di osservazione. Diversamente, se si considera la media degli illuminamenti alla cornea rilevato in tutte le possibili postazioni di un osservatore anziano nel periodo primaverile nel locale soggiorno, non si verifica attivazione circadiana in nessuna stagione considerata nella simulazione. (Figura 28).



**Figura 26 - Risultati di simulazione per l'illuminamento all'occhio nella camera in condizioni di cielo intermedio senza tenda**

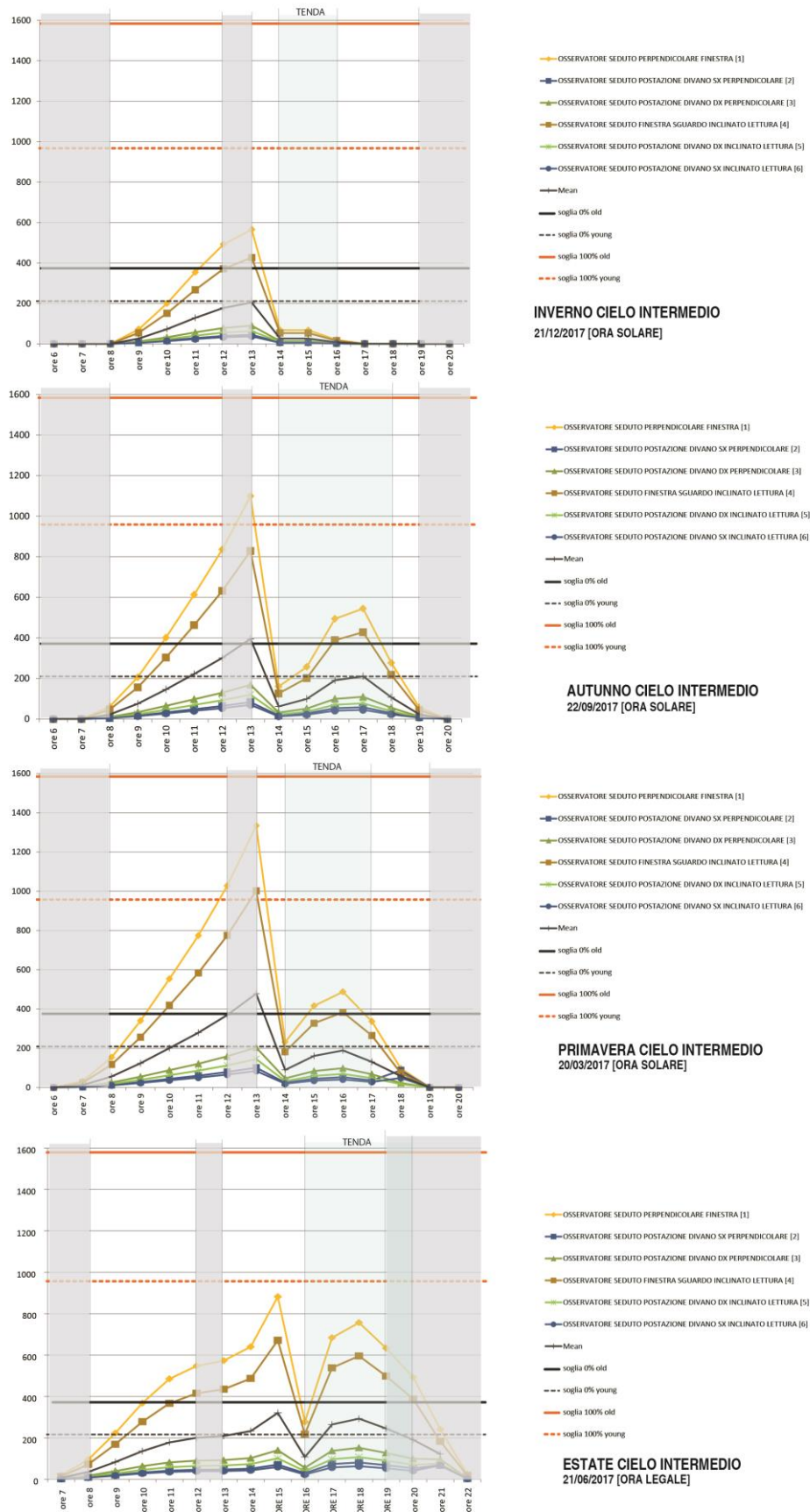
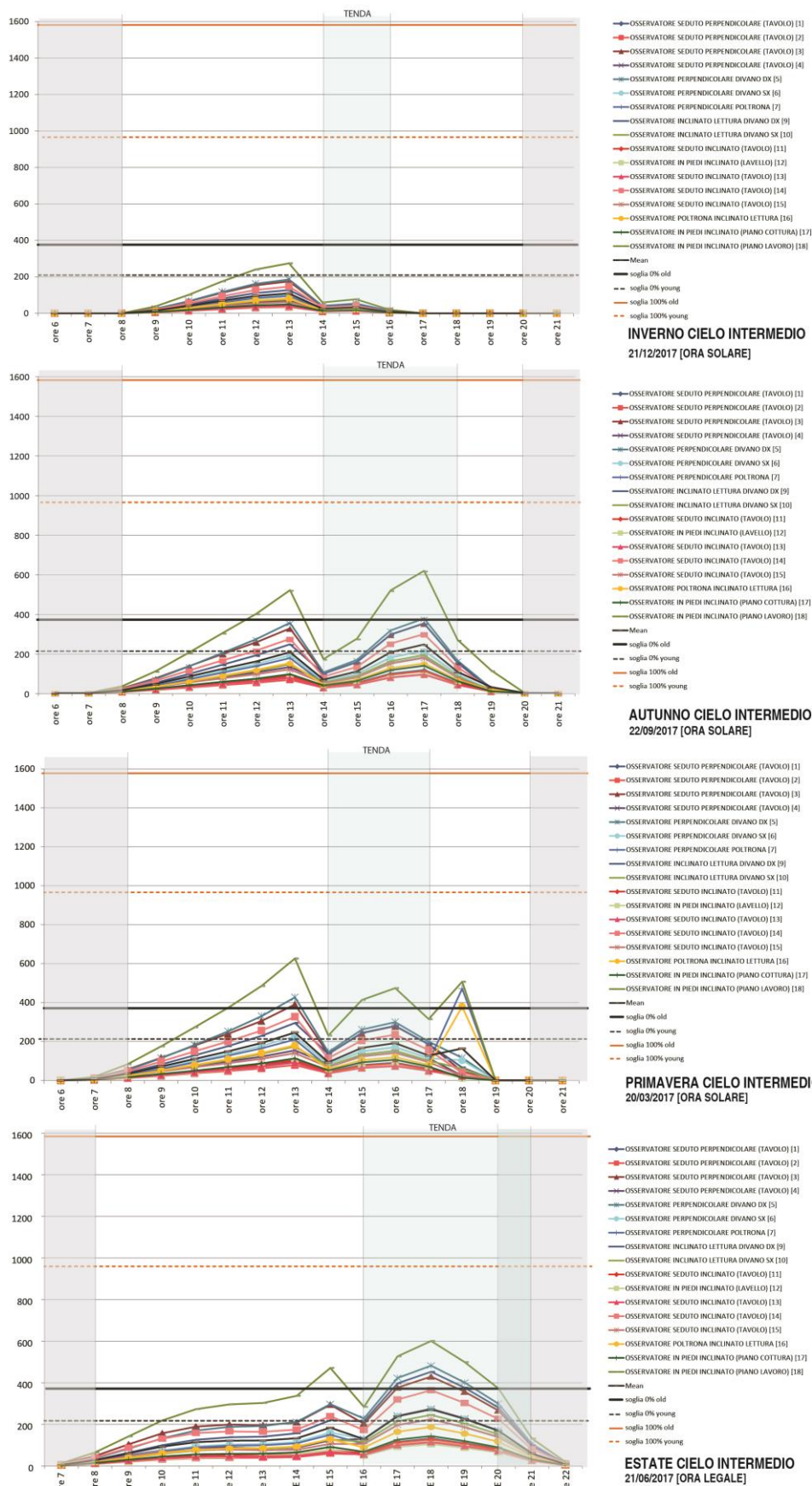


Figura 27 - Risultati di simulazione per l'illuminamento all'occhio nella stanza Studio in condizioni di cielo intermedio con tenda



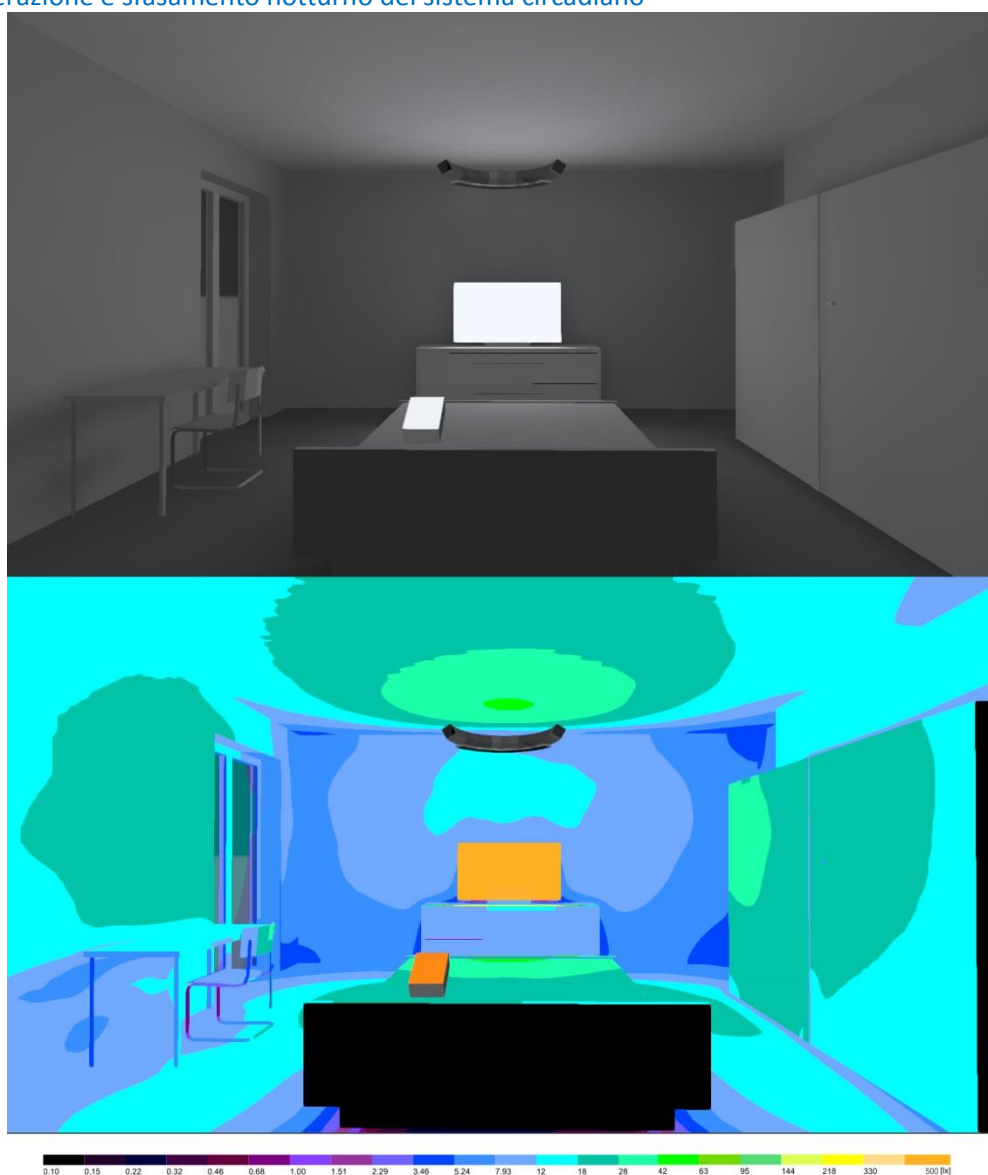
**Figura 28 - Risultati di simulazione per l'illuminamento all'occhio nel locale Soggiorno in condizioni di cielo intermedio con tenda**

### 1.5 Risultati di simulazione dello scenario luce artificiale

In seguito alle simulazioni di luce naturale e ai risultati ottenuti, si è calcolato l'illuminamento alla cornea di un osservatore anziano derivato da sistemi di illuminazione artificiale sia multimediali (tv e tablet) sia tradizionali (apparecchi di illuminazione) al fine di determinare il loro contributo rispetto ad un'attivazione circadiana che tenda a rifasare o sfasare il sistema endocrino umano. In particolare si è effettuata una simulazione nel locale camera da letto con i soli sistemi multimediali accesi come un televisore LCD e un tablet al fine di calcolare l'alterazione del sistema circadiano e l'eventuale sfasamento della secrezione della melatonina nelle ore serali e notturne della giornata.

È stato inoltre calcolato il contributo al rifasamento circadiano durante le ore diurne di un sistema di illuminazione artificiale caratterizzato da apparecchi di illuminazione ipotizzati per tale scopo e inseriti nei locali camera da letto, soggiorno e studio. Tale simulazione mista di illuminazione artificiale e naturale è stata realizzata considerando la condizioni di cielo più sfavorevole (cielo coperto) e il periodo dell'anno con minore ingresso della luce naturale negli interni (inverno 21 dicembre 2017).

#### 1.5.1 Alterazione e sfasamento notturno del sistema circadiano



**Figura 29 – Simulazione di illuminazione artificiale nel locale camera da letto per calcolo dell'influenza del sistema luce di apparecchiature luminose elettroniche (TV e Tablet) sull'alterazione e sfasamento notturno del sistema circadiano**

La simulazione relativa all'illuminazione derivata dall'accensione di un televisore LCD e di un e-Book elettronico tipo tablet in condizioni di luce ambiente completamente spenta deriva dalla necessità di



comprendere quale sia l'effetto circadiano di questi apparecchi di intrattenimento che si usano nelle ore precedenti al riposo notturno (Figura 29) fornendo una quantità di luce potenzialmente dannosa per il sonno.

Per quanto riguarda il televisore con display LCD è stato utilizzato un modello in commercio delle dimensioni di 120 x 67cm con una luminanza media di 400cd/m<sup>2</sup>. Per quanto riguarda l'e-book elettronico tipo tablet è stato utilizzato un modello in commercio delle dimensioni di 24.1 x 18.5cm con una luminanza media di 200cd/m<sup>2</sup> e temperatura di colore correlata di 6000K.

È stato stimato l'utilizzo di tali apparecchiature per circa 2/3 ore prima di andare a dormire dalle ore 21.00 alle ore 24.00. In particolare sono stati calcolati i valori di illuminamento alla cornea dei diversi osservatori posizionati seduti sul letto a destra e a sinistra con gli apparecchi accesi singolarmente e insieme.

**Tabella 8 - Valori di illuminamento fotopico ottenuti in simulazione di illuminazione artificiale derivata da apparecchiature multimediali come un monitor TV e un e-book elettronico tipo tablet**

	TELEVISORE LCD	E-BOOK ELETTRONICO TABLET	TELEVISORE LCD + E-BOOK ELETTRONICO TABLET
OSSERVATORE PERPENDICOLARE SEDUTO TV DX [1]	33.1lux	1.21lux	34.3lux
OSSERVATORE SEDUTO LETTO INCLINATO COMPUTER/LETTO DX [5]	28.5lux	1.68lux	30.2lux
VALORE MEDIO OSSERVATORE DX	<b>30.8lux</b>	<b>1.45lux</b>	<b>32.25lux</b>
OSSERVATORE PERPENDICOLARE SEDUTO TV SX [3]	31.9lux	26.8lux	58.7lux
OSSERVATORE SEDUTO LETTO INCLINATO COMPUTER/LETTO SX [6]	26.9lux	39.2lux	66.2lux
VALORE MEDIO OSSERVATORE SX	<b>29.4lux</b>	<b>33lux</b>	<b>62.45lux</b>

I valori sono stati simulati prendendo in considerazione un osservatore che guarda in posizione parallela direttamente verso la TV e un osservatore con sguardo inclinato di 30° verso il basso. In particolare la distanza dell'occhio rispetto al piano luminoso dell'e-book elettronico (tablet) è stata tenuta fissa a circa 40cm.

I risultati di illuminamento ottenuti nei vari scenari definiti dal solo televisore acceso, dal solo tablet acceso e da entrambi accesi contemporaneamente descrivono valori di illuminamento compresi tra 26.9lux (valore minimo) e 66.2lux (valore massimo ottenuto per un osservatore che stia contemporaneamente osservando il tablet e il televisore) (Tabella 8). Tali valori risultano congruenti con quelli ottenuti in alcuni studi sperimentali simili<sup>24</sup>, che hanno fornito la prova che l'illuminazione a cui si è esposti tra il tramonto e prima di coricarsi, in particolare derivata da apparecchiature elettroniche di lettura come i tablet con temperature di colore molto elevate, ha effetti biologici profondi. In particolare tali condizioni di illuminazione (circa 31lux di illuminamento fotopico a 6000K derivati dall'uso di un tablet a 30-45cm di distanza dall'occhio per 4 ore) inducono la soppressione dei livelli di melatonina di sera, causando la diminuzione della sonnolenza nelle ore serali, determinando uno spostamento in avanti di circa 10 minuti del momento di addormentamento, determinando un movimento meno rapido degli occhi (fase REM) durante il sonno e questo, a sua volta, causa difficoltà nel risveglio pieno con alterata vigilanza durante la mattina. I risultati di questo studio effettuato su soggetti giovani (24.92 età media) dimostra che l'illuminazione nelle ore precedenti all'addormentamento, per un periodo prolungato di tempo (circa 4 ore) con tali livelli di illuminamento sulla cornea può sfasare la secrezione di melatonina nel sangue e quindi alterare il ritmo circadiano in maniera consistente e questo, a sua volta, può avere un impatto negativo sulle prestazioni e la salute perché induce ad un disallineamento della fase circadiana e rischia di determinare carenze croniche di sonno e quindi l'insorgere dell'insonnia.

In realtà, tale studio non investiga sull'influenza dell'uso di tali apparecchiature su un osservatore anziano con caratteristiche del sistema visivo effettivamente diverse da un osservatore giovane. In aggiunta a questo, lo studio non verifica l'influenza dell'illuminazione di questi sistemi protratta nel tempo, ovvero non prende in considerazione l'assuefazione ad un'esposizione continuata di questo tipo nelle ore notturne prima di andare a dormire.

### 1.5.2 Regolazione e rifasamento diurno del sistema circadiano

Lo studio dell'illuminazione artificiale ha tenuto in considerazione l'installazione di una serie di apparecchi custom (individuati come proposte preliminari di studio) a temperatura di colore variabile nei vari locali della casa al fine di contribuire all'attivazione circadiana nelle ore diurne e primo pomeriggio in condizioni di illuminazione naturale scarsa nell'interno domestico considerato. A tale scopo è stata effettuata una simulazione in condizioni di cielo coperto nel mese invernale di dicembre alle ore 9.00 del mattino, momento della giornata in cui è utile aumentare il livello di illuminamento all'occhio e, dai risultati ottenuti nelle simulazioni, la luce naturale non sembra essere efficace a determinare effetti non visivi. In questo orario il soggetto potrebbe trovarsi in camera da letto oppure in soggiorno/cucina. Tale momento e condizione meteorologica è stata selezionata in maniera tale da simulare lo scenario peggiore, ovvero quando le condizioni non sono assolutamente utili ad attivare il sistema circadiano e un osservatore anziano sia maggiormente costretto in casa per via delle condizioni climatiche sfavorevoli.

Tenendo in considerazione queste premesse, per ogni locale dell'abitazione, sono stati calcolati i valori di illuminamento relativi ai punti di osservazione precedentemente considerati, al fine di verificare la possibilità di ottenere un'attivazione circadiana tramite il sistema di illuminazione artificiale. Inoltre, sono stati calcolati i valori di illuminamento sulle superfici utili dei piani di lavoro orizzontali per verificare non solo la parte relativa agli effetti non-visivi dell'illuminazione ma anche gli effetti visivi della stessa.

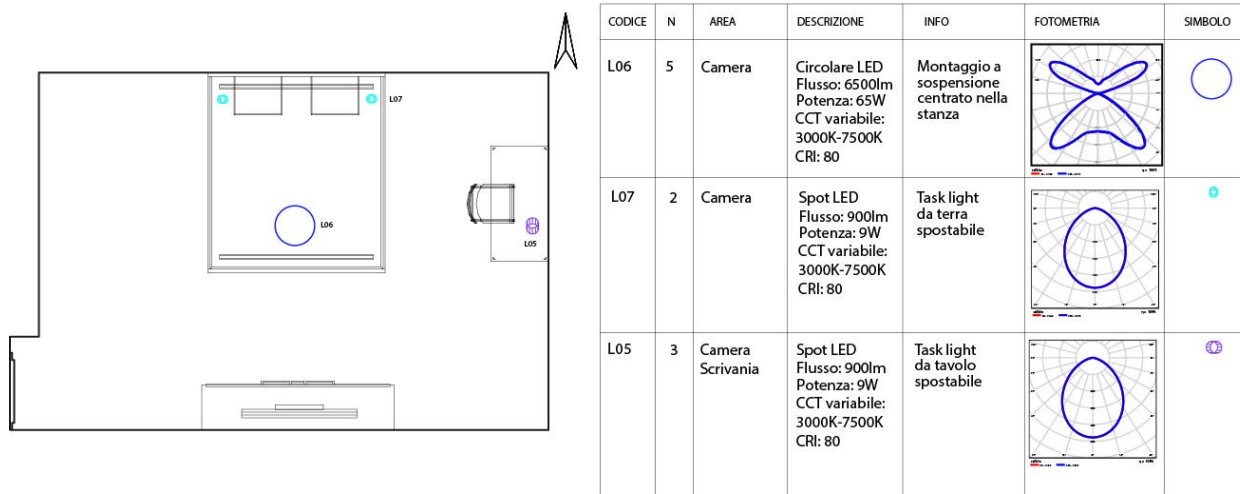
Gli apparecchi di illuminazione considerati non sono reperibili sul mercato ma sono dei sistemi custom le cui performance sono quelle desiderate per un progetto che riesca a raggiungere effetti visivi e non visivi, in maniera efficiente. Per questa simulazione specifica gli apparecchi di illuminazione concepiti a temperatura di colore variabile saranno impostati sulla temperatura di colore di cielo coperto, ovvero 6500K.

#### 1.5.2.1 Stanza da letto

La stanza da letto è stata equipaggiata, in questo esempio, con un apparecchio di illuminazione custom a LED da sospensione con distribuzione diretta e indiretta della luce. La sospensione centrale nella stanza è stata utilizzata sia perché negli ambienti domestici solitamente esiste un punto di illuminazione al centro della stanza sia perché in questo modo si riesce ad illuminare l'intera zona di calpestio in maniera più uniforme ed efficiente. Questo apparecchio ha il compito di risvegliare l'individuo in maniera naturale simulando il sorgere del sole sia con un'emissione indiretta a soffitto che simula l'albeggio sia con un'emissione diretta che è funzionale ad aumentare i livelli di illuminamento sull'occhio e quindi utile a rifasare il sistema circadiano e risvegliare l'individuo in maniera completa. Allo stesso modo, l'apparecchio sarà utilizzato per simulare un tramonto artificiale nella stanza da letto nelle ore serali, riducendo lentamente l'intensità luminosa e la temperatura correlata di colore prima che l'individuo si addormenti. La distribuzione luminosa dell'apparecchio è controllabile in maniera da accendere solo l'indiretta o solo la diretta e, per quest'ultima, solo una porzione della stessa al fine di illuminare solo una porzione del letto (destra o sinistra) e non creare disturbo nell'altra zona. Sono stati inoltre inseriti degli apparecchi task light per l'illuminazione focalizzata sulle postazioni letto dove l'osservatore risulta seduto o sdraiato. Tale illuminazione contribuisce in maniera efficiente ad aumentare i livelli di illuminamento dell'occhio per il risveglio e per mantenerli elevati durante la giornata nel caso in cui la persona sia costretta a letto. Infine un ulteriore apparecchio di illuminazione è stato posizionato per la postazione scrivania (nel caso in cui questa sia utilizzata). In aggiunta, gli apparecchi di illuminazione hanno una CCT variabile compresa tra i 3000K e i 6500K. Le caratteristiche specifiche degli apparecchi sono riportate in Figura 30.



### LEGENDA APPARECCHI



**Figura 30 - RCP Lighting plan per il locale camera da letto con legenda apparecchi installati per la simulazione in Dialux**

**Tabella 9 - Valori di illuminamento fotopico all'occhio e comparazione dei risultati con i valori di soglia per verificare attivazione circadiana – stanza da letto**

	OSSERVATORE PERPENDICOLARE SEDUTO TV DX [1]	OSSERVATORE VERSO L'ALTO SDRAIATO DX [2]	OSSERVATORE PERPENDICOLARE SEDUTO TV SX [3]	OSSERVATORE VERSO L'ALTO SDRAIATO SX [4]	OSSERVATORE SEDUTO LETTO INCLINATO LETTURA LETTO DX [5]	OSSERVATORE SEDUTO LETTO INCLINATO LETTURA LETTO SX [6]	MEDIA DEI PUNTI DI OSSERVAZIONE POSIZIONE SEDUTA
Illuminamento fotopico all'occhio	366lux	1212lux	393 lux	1367lux	224lux	224lux	302 lux
Valore di soglia osservatore anziano	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux
Valore di soglia osservatore giovane	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux
	✓	✓	✓	✓	X	X	✓

I risultati, per il calcolo del livello di illuminamento alla cornea, utile per l'attivazione circadiana dell'individuo giovane e anziano, nel locale stanza da letto, tramite apparecchi di illuminazione artificiale sono riportati in Tabella 9. Considerando due osservatori seduti a letto con sguardo perpendicolare e/o inclinato si otterrà una media di **302lux** che risultano sufficienti per l'attivazione circadiana. Considerando un osservatore sdraiato a letto con sguardo rivolto verso l'alto si otterrà un illuminamento medio alla cornea molto elevato di circa **1289lux**. Questo valore deriva dall'accensione di tutti gli apparecchi di illuminazione della stanza e risulta molto elevato. Se si considera che l'attivazione circadiana per questa posizione avverrà al mattino al risveglio si deve tener conto che tale attivazione dovrebbe avvenire senza abbagliare il soggetto e quindi prediligendo un'illuminazione indiretta, sulla diretta, della sospensione centrale e un'accensione graduale e dimmerata al 20% della task light (l'illuminamento medio sulla cornea riferito ad entrambi gli osservatori di circa **325lux**).

La simulazione inoltre riporta i valori di illuminamento medio mantenuto sul pavimento di circa **171lux** e di valori elevati di illuminamento medio (**1371lux**) su un piano passante per una superficie virtuale di un libro posto a 35 cm di distanza dall'osservatore(Figura 32).



Figura 31 - Rappresentazione dello scenario di illuminazione naturale e artificiale nel locale Soggiorno. Rappresentazione dei falsi colori per i valori di illuminamento

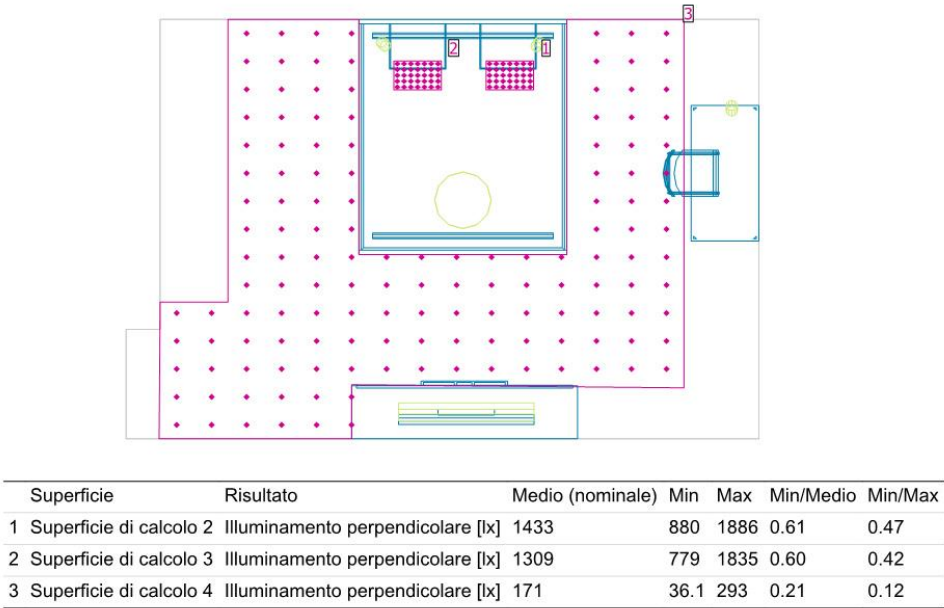
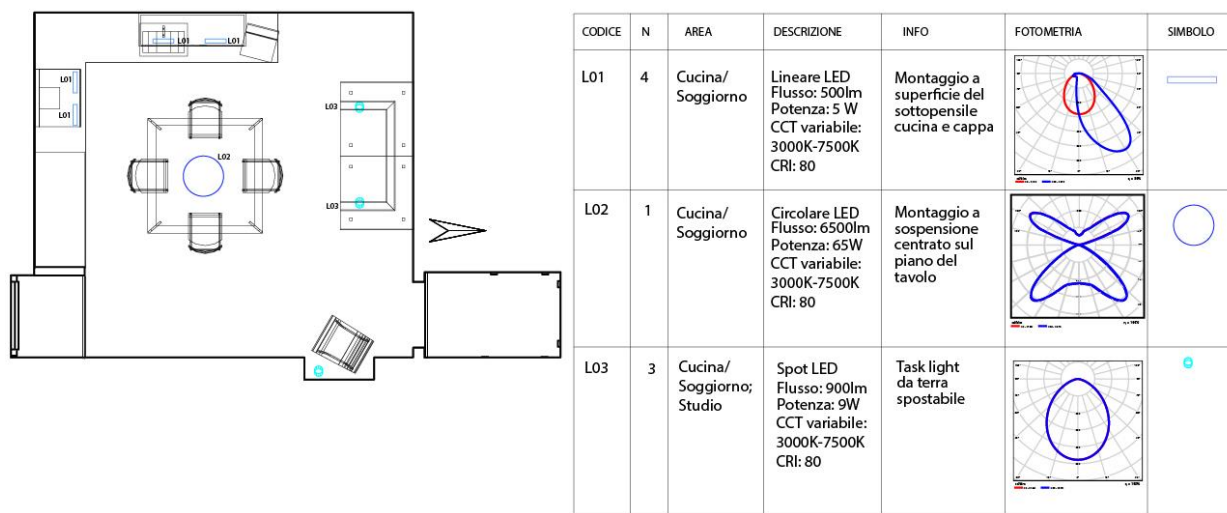


Figura 32 - Valori di illuminamento simulati nel locale camera da letto per le superfici più significative

### 1.5.2.2 Soggiorno

Il locale soggiorno è stato equipaggiato tramite un apparecchio di illuminazione a sospensione centrale con un'emissione diretta e indiretta. Questo apparecchio è dinamico nella misura in cui può variare la percentuale di emissione diretta e di emissione indiretta in modo da attivare il sistema circadiano combinandosi con l'illuminazione naturale in maniera più efficiente e confortevole. A questo sistema di illuminazione d'ambiente sono stati aggiunti sistemi di illuminazione funzionale nei sotto-pensile della cucina e delle task light da terra spostabili e flessibili in maniera tale da seguire l'individuo nelle posizioni di osservazione che egli di solito utilizzerà nel proprio ambiente. Tutti gli apparecchi di illuminazione hanno una CCT variabile compresa tra i 3000K e i 6500K. Le caratteristiche specifiche degli apparecchi sono riportate in Figura 33.

LEGENDA APPARECCHI



**Figura 33 – RCP Lighting plan per il locale soggiorno con legenda apparecchi installati per la simulazione in Dialux**

I risultati, per il calcolo del livello di illuminamento alla cornea, utile per l'attivazione circadiana dell'individuo giovane e anziano, nel locale soggiorno, mediante l'utilizzo di apparecchi di illuminazione artificiale, sono riportati in Tabella 10. In particolare, sono state considerate tre zone di attività di cui due statiche, ovvero la zona centrale del tavolo e le zone perimetrali del divano e della poltrona, e una zona dinamica, ovvero la zona del piano di lavoro della cucina. Mentre le zone statiche prevedono che l'utente sarà seduto e quindi stazionerà in queste posizioni di osservazione per molto tempo, la zona dinamica prevede che l'utente sia in piedi e stia svolgendo un'attività di durata limitata nel tempo.

Dall'analisi dei risultati, la zona dinamica non risulta raggiungere livelli di illuminamento sufficienti per l'attivazione circadiana. Questa situazione non risulta essere particolarmente problematica dato che si tratta di una zona in cui gli osservatori stazionano per un periodo limitato di tempo e che, di solito, risulta l'unica zona in cui si raggiungono livelli circadiani grazie alla sola illuminazione nelle condizioni di cielo sereno e intermedio.

Diversamente, gli osservatori posizionati nella zona del tavolo, risultano avere un illuminamento alla cornea superiore al livello di soglia utile per un corretto rifasamento circadiano. In particolare, considerando che lo sguardo dell'osservatore sarà perpendicolare e inclinato verso il piano del tavolo, quando egli stazionerà nelle quattro postazioni considerate, si raggiunge un illuminamento medio sull'occhio di **298lux** sufficienti a garantire una prima fase di attivazione circadiana.

Nella zona del divano si presuppone che l'osservatore stazionerà per un periodo prolungato di tempo in attività di relax e lettura. In questa situazione, l'utilizzo congiunto dei sistemi di illuminazione e della task light determinano il raggiungimento di un illuminamento medio sull'occhio di **464lux** (considerando sia lo sguardo inclinato sia lo sguardo perpendicolare).

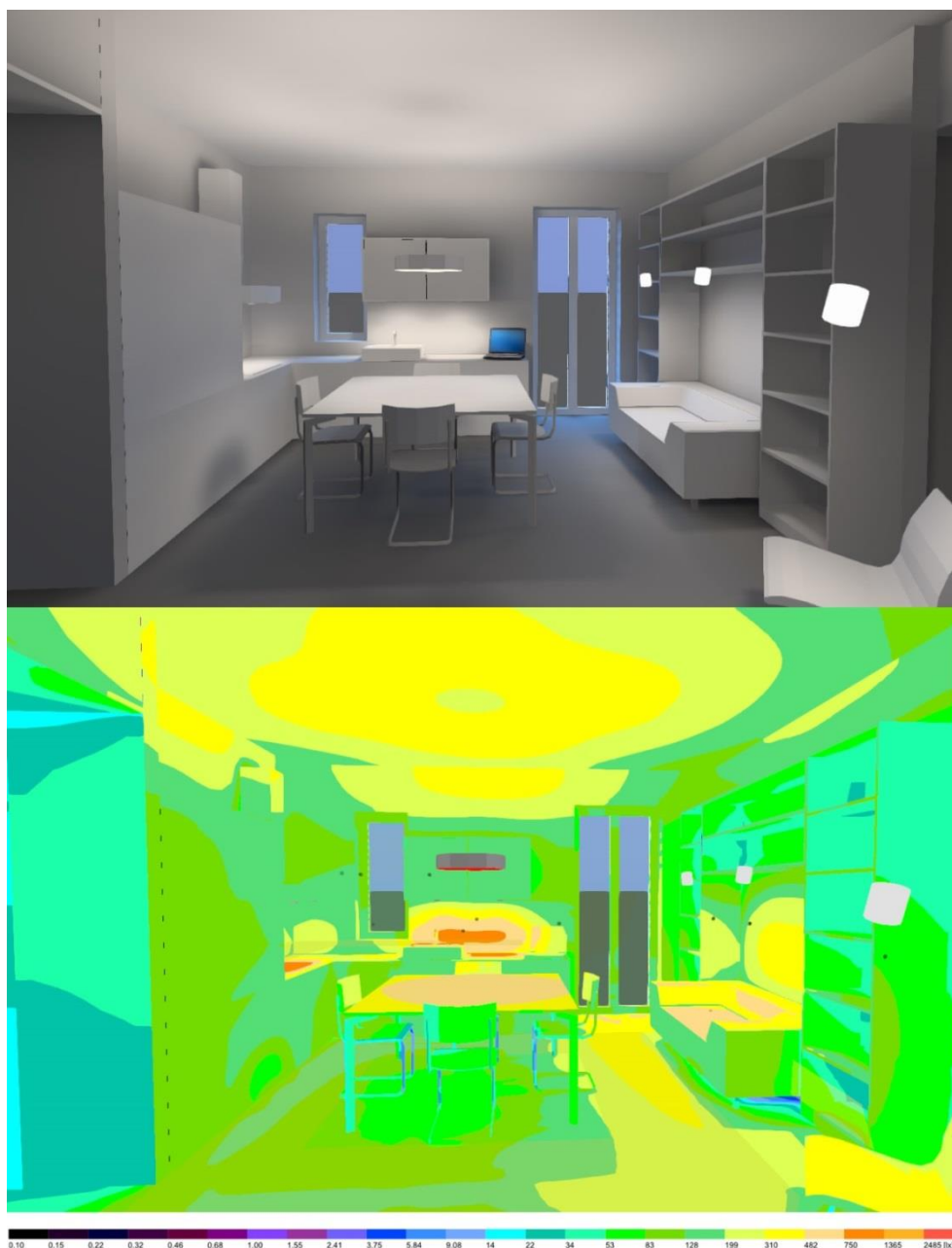
Nella zona più periferica della stanza, laddove è situata la poltrona, si raggiunge un livello di illuminamento medio sull'occhio di **447lux**.

**Tabella 10 – Valori di illuminamento fotopico all’occhio e comparazione dei risultati con i valori di soglia per verificare attivazione circadiana – stanza soggiorno**

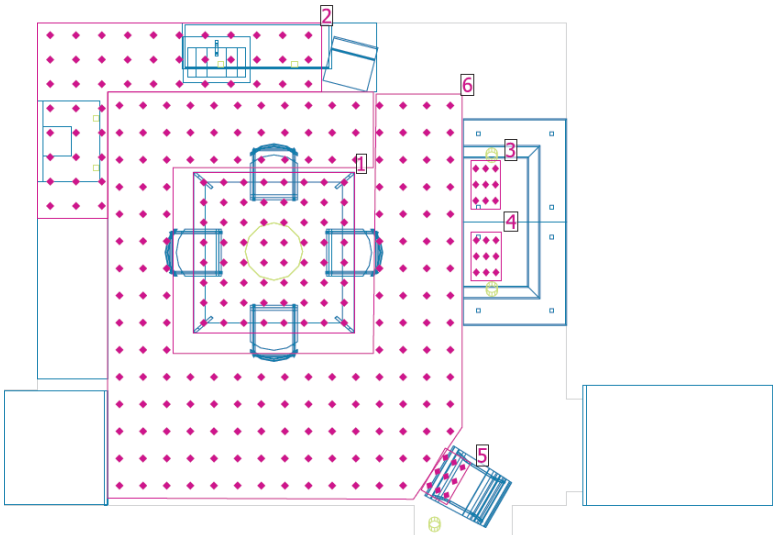
Zona piano di lavoro cucina	OSSERVATORE IN PIEDI INCLINATO (LAVELLO) [12]	OSSERVATORE IN PIEDI INCLINATO (PIANO COTTURA) [17]	OSSERVATORE IN PIEDI INCLINATO (PIANO LAVORO) [18]						
Illuminamento fotopico all’occhio	152lux	133lux	156lux						
Valore di soglia osservatore anziano	298lux	298lux	298lux						
Valore di soglia osservatore giovane	171lux	171lux	171lux						
	X	X	X						
Zona tavolo	OSSERVATORE SEDUTO PERPENDICOLARE (TAVOLO) [1]	OSSERVATORE SEDUTO PERPENDICOLARE (TAVOLO) [2]	OSSERVATORE SEDUTO PERPENDICOLARE (TAVOLO) [3]	OSSERVATORE SEDUTO PERPENDICOLARE (TAVOLO) [4]	OSSERVATORE SEDUTO INCLINATO (TAVOLO) [11]	OSSERVATORE SEDUTO INCLINATO (TAVOLO) [13]	OSSERVATORE SEDUTO INCLINATO (TAVOLO) [14]	OSSERVATORE SEDUTO INCLINATO (TAVOLO) [15]	MEDIA DEI PUNTI DI OSSERVAZIONE AL TAVOLO
Illuminamento fotopico all’occhio	326lux	310lux	329lux	305lux	279lux	269lux	288lux	280lux	298lux
Valore di soglia osservatore anziano	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux
Valore di soglia osservatore giovane	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux
	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	✓
Zona divano/poltrona	OSSERVATORE PERPENDICOLARE DIVANO DX [5]	OSSERVATORE PERPENDICOLARE DIVANO SX [6]	OSSERVATORE PERPENDICOLARE POLTRONA [7]	OSSERVATORE INCLINATO LETTURA DIVANO DX [9]	OSSERVATORE INCLINATO LETTURA DIVANO SX [10]	OSSERVATORE POLTRONA INCLINATO LETTURA [16]	MEDIA DEI PUNTI DI OSSERVAZIONE DIVANI/POLTRONA		
Illuminamento fotopico all’occhio	755lx	818lux	131lux	152lux	791lux	102lux	464 lux 447 lux		
Valore di soglia osservatore anziano	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux		
Valore di soglia osservatore giovane	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux		
	✓	✓	X	X	✓	X	✓		

Al contempo, si sono verificati i livelli di illuminamento (Figura 35) sulle più importanti superfici di lavoro nello spazio, come il piano del tavolo da pranzo (illuminamento medio mantenuto di 545lux con uniformità

0.6), il piano di lavoro della cucina (illuminamento medio mantenuto di 656lux), i piani inclinati corrispondenti alla posizione di un libro nella zona divano (illuminamento medio mantenuto di e 692lux e 679lux) e nella zona poltrona (illuminamento medio mantenuto di e 597lux), e il piano di calpestio del pavimento (illuminamento medio mantenuto di 197lux). Questi valori di illuminamento risultano elevati ma conformi agli illuminamenti utili alla visione per soggetti anziani che necessitano di maggiori livelli soprattutto nelle attività di concentrazione, lavoro dettagliato e lettura.



**Figura 34 - Rappresentazione dello scenario di illuminazione naturale e artificiale nel locale Soggiorno.**  
**Rappresentazione dei falsi colori per i valori di illuminamento**



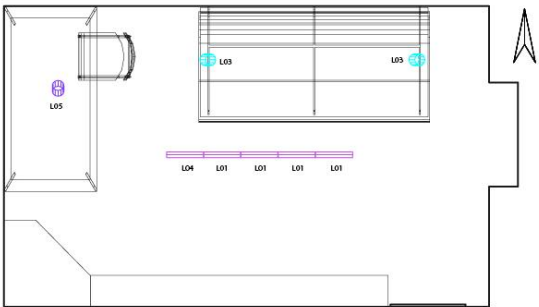
Superficie	Risultato	Medio (nominale)	Min	Max	Min/Medio	Min/Max
1 Superficie di calcolo 9	Illuminamento perpendicolare [lx]	545	350	611	0.64	0.57
2 Superficie di calcolo 10	Illuminamento perpendicolare [lx]	656	176	1650	0.27	0.11
4 Superficie di calcolo 12	Illuminamento perpendicolare [lx]	679	606	764	0.89	0.79
3 Superficie di calcolo 13	Illuminamento perpendicolare [lx]	692	617	774	0.89	0.80
5 Superficie di calcolo 14	Illuminamento perpendicolare [lx]	597	464	742	0.78	0.63
6 Superficie di calcolo 15	Illuminamento perpendicolare [lx]	197	79.4	442	0.40	0.18

Figura 35 - Valori di illuminamento simulati nel locale soggiorno per le superfici più significative

1.5.2.3 Studio

Il locale studio è stato equipaggiato con un apparecchio di illuminazione lineare a sospensione con emissione indiretta, e una serie di apparecchi di illuminazione task da terra e da tavolo da posizionare, in maniera flessibile, nello spazio della stanza, in funzione delle varie posizioni e attività dell’osservatore. Anche in questo caso entrambi gli apparecchi di illuminazione hanno la possibilità di variare la CCT tra 3000K e 7500K. Le caratteristiche specifiche degli apparecchi sono riportate in Figura 36.

LEGENDA APPARECCHI



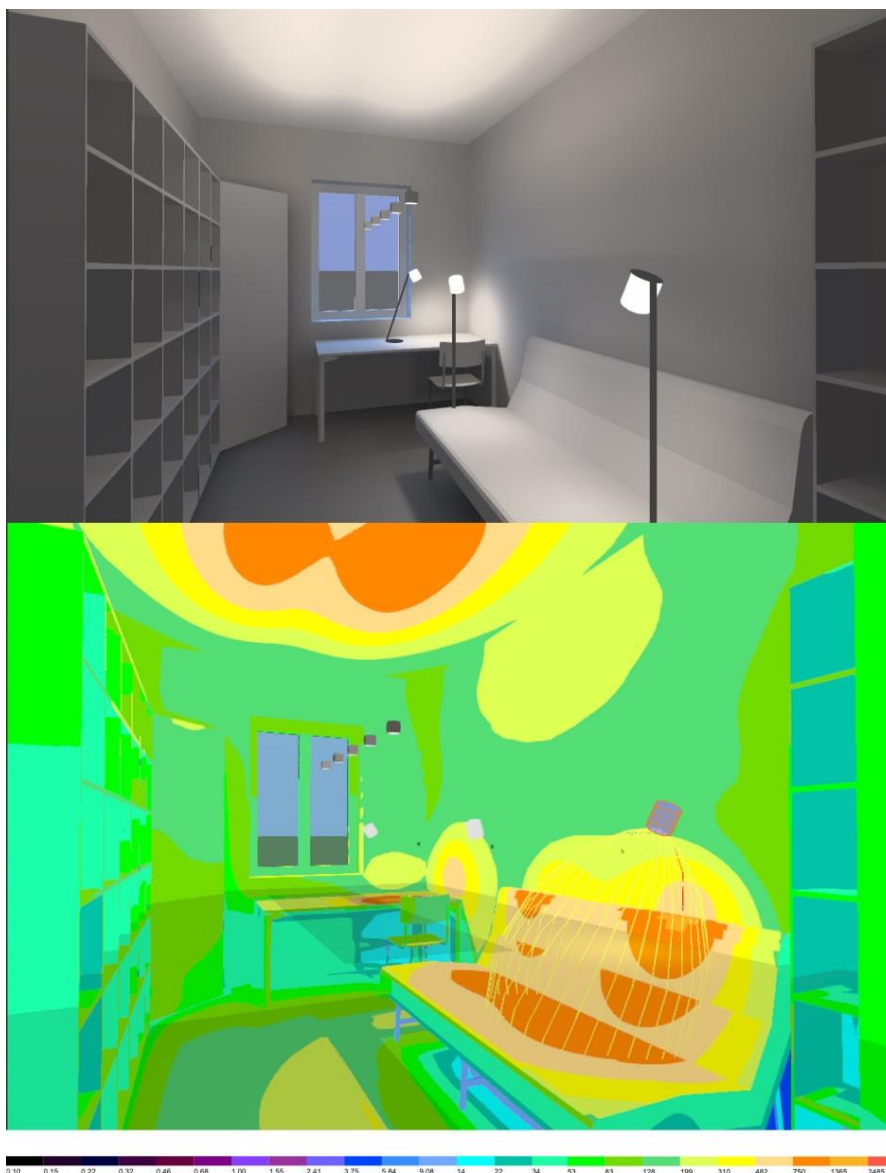
CODICE	N	AREA	DESCRIZIONE	INFO	FOTOMETRIA	SIMBOLO
L04	5	Studio	Lineare LED Flusso: 900lm Potenza: 9 W CCT variabile: 3000K-7500K CRI: 80	Montaggio a sospensione		
L03	2	Studio	Spot LED Flusso: 900lm Potenza: 9W CCT variabile: 3000K-7500K CRI: 80	Task light da terra spostabile		
L05	1	Studio	Spot LED Flusso: 900lm Potenza: 9W CCT variabile: 3000K-7500K CRI: 80	Task light da tavolo spostabile		

Figura 36 – RCP Lighting plan per il locale studio con legenda apparecchi installati per la simulazione in Dialux



**Tabella 11 - Valori di illuminamento fotopico all'occhio e comparazione dei risultati con i valori di soglia per verificare attivazione circadiana – stanza studio**

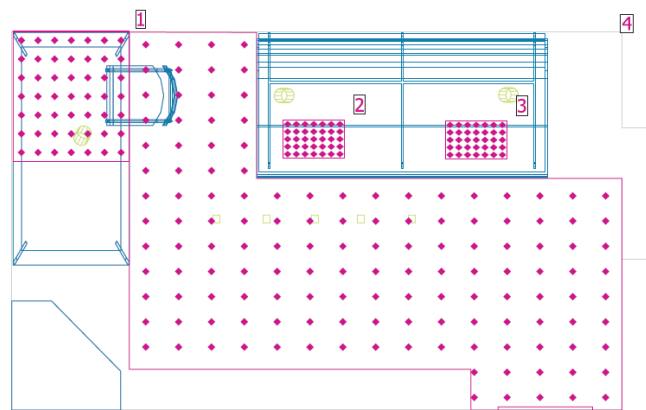
	OSSERVATORE SEDUTO PERPENDICOLARE FINESTRA [1]	OSSERVATORE SEDUTO POSTAZIONE DIVANO SX PERPENDICOLARE [2]	OSSERVATORE SEDUTO POSTAZIONE DIVANO DX PERPENDICOLARE [3]	OSSERVATORE SEDUTO FINESTRA SGUARDO INCLINATO LETTURA [4]	OSSERVATORE SEDUTO POSTAZIONE DIVANO DX INCLINATO LETTURA [5]	OSSERVATORE SEDUTO POSTAZIONE DIVANO SX INCLINATO LETTURA [6]
Illuminamento fotopico all'occhio	523lux	350lux	352lux	479lux	119lux	110lux
Valore di soglia osservatore anziano	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux	298lux
Valore di soglia osservatore giovane	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux	171lux
	✓	✓	✓	✓	X	X



**Figura 37 – Rappresentazione dello scenario di illuminazione naturale e artificiale nel locale Studio. Rappresentazione dei falsi colori per i valori di illuminamento.**

I risultati, per il calcolo del livello di illuminamento alla cornea, utile per l'attivazione circadiana dell'individuo giovane e anziano, nel locale studio, tramite apparecchi di illuminazione artificiale, sono riportati in Tabella 11. Considerando un osservatore seduto alla scrivania con sguardo perpendicolare e/o inclinato si otterrà una media di **501lux**. Considerando un osservatore seduto sul divano con sguardo perpendicolare si otterrà un illuminamento alla cornea di **350lux** circa.

Al contempo, si sono verificati i livelli di illuminamento (Figura 38) sulle più importanti superfici di lavoro nello spazio come il piano della scrivania (illuminamento medio mantenuto di 702lux), i piani inclinati corrispondenti alla posizione di un libro nella zona divano (illuminamento medio mantenuto di 894lux e 815lux) e il piano di calpestio del pavimento (illuminamento medio mantenuto di 144lux). Questi valori risultano utili alla corretta visione di un osservatore anziano, che necessita di valori di illuminamento più elevati<sup>25</sup> rispetto ad un osservatore giovane, soprattutto in corrispondenza dei piani di lavoro in cui si richiede più concentrazione.



Superficie	Risultato	Medio (nominale)	Min	Max	Min/Medio	Min/Max
1 Superficie di calcolo 5	Illuminamento perpendicolare [lx]	702	152	1451	0.22	0.10
2 Superficie di calcolo 6	Illuminamento perpendicolare [lx]	894	526	1181	0.59	0.45
3 Superficie di calcolo 7	Illuminamento perpendicolare [lx]	815	481	1062	0.59	0.45
4 Superficie di calcolo 8	Illuminamento perpendicolare [lx]	144	9.93	274	0.07	0.04

**Figura 38 – Valori di illuminamento simulati nel locale studio per le superfici più significative**

## 1.6 Conclusioni

### 1.6.1 Illuminazione naturale

L'intero studio relativo all'illuminazione naturale, disponibile in un contesto abitativo di esempio localizzato in Milano (Italia), rivela che, in particolari periodi dell'anno e con specifiche condizioni di illuminazione, la quantità e la qualità di luce a cui sono esposti i soggetti risulta limitata e non sufficiente per attivare effetti non visivi sul sistema circadiano di un individuo anziano.

Tenendo ben presente le limitazioni dello studio che è stato condotto su una tipologia abitativa con un orientamento, posizionamento, localizzazione specifica, di seguito si riassumono i principali risultati. Per quanto riguarda l'illuminazione utile al risveglio nel locale camera da letto, considerando un periodo compreso tra le ore 6.00 e le ore 9.00, i risultati complessivi dimostrano che, nelle quattro stagioni in condizioni di cielo coperto e intermedio, i livelli di illuminamento sulla cornea raggiunti non sono sufficienti per rifasare il sistema circadiano al mattino. Queste condizioni si verificano il 48% dell'anno per la latitudine selezionata. Ovviamente tali condizioni di illuminazione migliorano considerevolmente in condizioni di cielo sereno durante il quale l'attivazione circadiana si ottiene con la sola illuminazione naturale.

Il periodo di attivazione circadiana nella prima porzione della giornata (ore 6.00 – 10.00) non è garantito nel locale soggiorno in condizioni di cielo coperto e intermedio durante l'intero corso dell'anno (48% dell'anno per la latitudine selezionata). In condizioni di cielo sereno, la situazione luminosa interna, in questo locale, in questo lasso di tempo, non risulta attivare il sistema circadiano in maniera efficace a causa

dell'orientamento specifico dell'abitazione e della profondità della stanza. I risultati suggeriscono che sarebbe utile aumentare l'ingresso di luce all'interno di questa stanza al mattino durante l'intero corso dell'anno in tutte le condizioni di cielo (coperto/sereno/intermedio) e dunque aumentare l'esposizione dei soggetti anziani ad una quantità e qualità di luce efficace per effetti non visivi.

In alternativa sarebbe possibile promuovere l'uscita e l'esposizione alla luce naturale in maniera regolare per i soggetti anziani che non hanno limitazioni motorie e risultano ancora attivi. Diversamente c'è da considerare che, in condizioni metereologiche sfavorevoli (cielo coperto e pioggia) e durante le stagioni fredde (autunno e inverno), soggetti anziani anche attivi e senza limitazioni motorie sono più restii ad uscire di casa e presentano uno stile di vita più sedentario: lo studio rivela che, anche a queste latitudini, in questo periodo dell'anno e in queste condizioni di cielo, i livelli di illuminazione non sono sufficienti ed efficaci per attivare il sistema circadiano in ambiente interno per un soggetto anziano.

Diversamente, i risultati dimostrano che il locale soggiorno e il locale studio siano efficacemente illuminati per attivare il sistema circadiano nel pomeriggio (ore 13.00 – 18.00) durante l'intero corso dell'anno con l'unica eccezione dell'inverno e di condizioni di cielo coperto (21% dell'intero anno). In relazione a quest'affermazione, è necessario approfondire la tematica del posizionamento dell'osservatore all'interno dei locali: infatti nella maggior parte dei casi in cui avviene attivazione circadiana tramite l'illuminazione naturale, il soggetto risulta orientato verso la sorgente di luce, in posizione molto ravvicinata rispetto alle finestrature con uno sguardo perpendicolare alla stessa. Questo è maggiormente evidente nel locale studio, laddove la scrivania è posizionata frontalmente rispetto alla finestra, e quindi un osservatore posizionato in questo luogo occupato in diverse attività, risulterà attivato a livello circadiano nella maggior parte dell'anno in tutte le condizioni di cielo.

Diversamente, in altri punti di osservazione più distanti dalle finestre e con orientamenti diversi, i soggetti non risultano efficacemente attivati, non solo in condizioni di cielo coperto ma anche in condizioni di cielo sereno ed intermedio. In conclusione dunque, l'effetto non visivo dell'illuminazione naturale avviene in maniera estensiva ed efficace vicino a fonti di illuminazione naturale e quindi se direttamente esposti alla luce; diversamente in condizioni di luce diffusa e indiretta nelle zone più lontane e remote dei locali, l'efficacia della luce naturale diminuisce sia per osservatori anziani che per osservatori giovani.

In relazione a questo, lo studio dimostra che in alcune condizioni di cielo specifiche (cielo coperto) e in alcuni periodi dell'anno particolari (prevalentemente inverno e autunno) e lontano da punti di osservazione vicini alle finestre, l'illuminazione non risulta efficace non solo per il sistema circadiano di un osservatore anziano ma non risulta funzionale neanche per un osservatore giovane. Di conseguenza, un posizionamento più vicino rispetto a fonti di illuminazione naturale oppure **un sistema di illuminazione artificiale di supporto risulta utile agli effetti visivi e non visivi per generazioni diverse di utenti.**

### 1.6.2 Illuminazione artificiale

Il presente studio propone una soluzione di illuminazione artificiale integrata all'illuminazione naturale che abbia una visione complessiva sul funzionamento del sistema circadiano in un ciclo di 24 ore.

Durante le ore successive alla cena e precedenti all'addormentamento, risulta necessario limitare l'esposizione all'illuminazione a CCT fredda e con picchi nelle corte lunghezze d'onda per evitare uno sfasamento del sistema circadiano e quindi un posticipo dell'addormentamento che a lungo andare può comportare problemi cronici a livello del sonno. I risultati dimostrano che la visione continuata nel periodo di tempo compreso tra le ore 18.00 e le ore 22.00 della televisione o la lettura di e-book elettronici potrebbe essere causa di problemi relativi al sistema circadiano. Per questo motivo sarebbe necessario ridurre al minimo i livelli di illuminamento sulla cornea (meno di 50lux) e utilizzare una luce con CCT più calda compresa tra i 2700K e i 3000K al fine di non interrompere la corretta secrezione di melatonina.

Diversamente durante le ore diurne nel primo mattino e almeno per un periodo continuativo di due ore, sarebbe necessario che l'osservatore fosse esposto a elevati livelli di illuminamento alla cornea superiori ai valori di soglia utili per un'attivazione circadiana efficace definiti per le diverse CCT. Questo risulta garantito

dall'utilizzo congiunto dell'illuminazione naturale e dell'illuminazione artificiale quando serve (in relazione alle condizioni del cielo e al periodo dell'anno), in maniera da bilanciare l'apporto delle componenti naturale e artificiale, e l'esposizione alla luce, tenendo in considerazione non solo la visione ma anche gli effetti non visivi della luce e assicurando, al contempo, efficienza energetica. In questo senso, il sistema di illuminazione risulta essere dinamico e correlato all'illuminazione naturale in termini di quantità e di temperatura correlata di colore.

Un ulteriore modo di garantire l'efficacia visiva e circadiana e l'efficienza energetica è l'utilizzo di sistemi di illuminazione funzionale e localizzata come le task light che possono essere spostate laddove è posizionato l'utente in maniera da ottenere livelli di illuminamento superiori, in zone specifiche, dove le attività vengono svolte.

### 1.6.3 Ulteriori studi

Al fine di ottenere maggiori informazioni sull'influenza circadiana della luce naturale e artificiale in un contesto abitativo domestico, il presente studio potrebbe essere ulteriormente approfondito mediante simulazioni di luce naturale che prendano in considerazione differenti posizionamenti del modello domestico in altre longitudini. Questo studio potrebbe essere utile per comprendere l'influenza della luce naturale in altri contesti Europei che hanno caratteristiche luminose differenti da quella studiata in questo specifico studio.

Inoltre, un ulteriore approfondimento dello studio potrebbe essere quello di prendere in considerazione la presenza di ostruzioni, come ad esempio edifici urbani, posizionati frontalmente rispetto alle finestrate considerate per questo studio. Questi elementi architettonici potrebbero modificare considerevolmente l'influenza e l'apporto dell'illuminazione naturale negli interni.

Al contempo, si potrebbe ulteriormente approfondire l'impatto dell'illuminazione naturale per esposizioni diverse da quelle utilizzate nel presente studio al fine di verificare l'influenza dell'illuminazione naturale in condizioni di orientamenti peggiori rispetto a quella ottimale di questo studio.

Implementazioni future potrebbero considerare l'utilizzo di altri software maggiormente dedicati al calcolo dell'illuminazione naturale durante l'intero anno al fine di modellare completamente il comportamento circadiano negli interni e non limitarlo ad un unico giorno isolato per definire un'intera stagione. A questi risultati si potrebbe unire la possibilità di effettuare delle misure nel contesto reale di cui il modello risulta una rappresentazione virtuale simulata al fine di verificare i dati ottenuti dalle simulazioni e quelli ottenuti nella realtà.

Infine, potrebbe essere interessante focalizzare l'attenzione sulla progettazione di sistemi meccanici e ottici simili a captatori solari utili per distribuire la luce naturale in maniera più razionale all'interno delle stanze al fine di ottenere una maggiore utilizzazione della stessa da un punto di vista di attivazione circadiana in maniera più efficiente, ovvero diminuendo la necessità di utilizzare l'illuminazione artificiale.

## 2 Attività B3

### 2.1 *Caratteristiche apparecchi di illuminazione per anziani.*

Sulla base delle analisi e discussioni sui concept proposti al punto B1 e considerando i risultati dello studio sull'integrazione tra luce naturale ed artificiale descritta al punto B2, gli ambienti domestici presi in esame per lo sviluppo del prodotto sono: lo studio, la camera da letto e il soggiorno.

La camera da letto è stata considerata in quanto è l'ambiente in cui è possibile ottenere i maggiori benefici dall'illuminazione circadiana: dall'esame della letteratura scientifica, l'adozione di alba e tramonto artificiale si sono dimostrati assai più efficaci di altre soluzioni nel miglioramento della qualità del sonno, che risulta essere un fattore molto importante per l'individuo.

Il soggiorno è stato scelto perché idealmente rappresenta la stanza della casa dove si trascorre la maggior parte del tempo e inoltre le soluzioni in esso sviluppate possono trovare applicazione, con piccole modifiche anche in altri ambienti della casa (per esempio lo studio).

Altri ambienti sono stati volutamente trascurati in quanto poco significativi dal punto di vista delle funzionalità di prodotto (es. corridoio che potrebbe essere illuminato in modo più vicino alle esigenze degli anziani, semplicemente utilizzando dei prodotti esistenti e qualche loro personalizzazione) o perché richiedevano un'elevata integrazione con arredi/architettura al fine di produrre un risultato gradevole e attrattivo verso l'utente finale.

Per quanto riguarda questi gli ambienti, si è ritenuto che un livello adeguato di illuminamento sui compiti visivi e una buona distribuzione del flusso luminoso per evitare abbagliamento (nel caso, ad esempio dei sotto-pensili della cucina) siano requisiti sufficienti per la maggior parte degli utenti che difficilmente sarebbero disposti a spendere cifre più elevate per un sistema di illuminazione destinato a questa applicazione.

Le **caratteristiche** che accomunano i sistemi di illuminazione per gli spazi prescelti sono le seguenti:

- **Temperatura di colore** variabile tra 3000 K e 7500K , in modo da garantire un possibile beneficio nella regolazione del ritmo circadiano di persone anziane;
- **Sistemi modulari** che consentano di ottenere apparecchi di "taglie" differenti combinando diversi elementi base;
- **Condivisione dell'elettronica di controllo** e di comunicazione e interfaccia con i sensori tra tutti gli apparecchi, indipendentemente dalla loro taglia;
- **Differenti tipologie di montaggio** che si diversificano a seconda dell'ambito applicativo: sospensione per illuminazione generale di soggiorno e camera da letto (il punto di alimentazione centrale nelle stanze è una pratica ancora molto diffusa), standing e task light per il soggiorno (compiti visivi quali lettura o lavoro manuale) e per la lettura a letto;
- Ciascun **apparecchio a sospensione dovrà avere una doppia emissione**: diretta e indiretta , ciascuna regolabile in intensità e tonalità della luce in maniera indipendente. Inoltre nell'apparecchio per la camera da letto dovrà essere garantita la possibilità di illuminare solo parzialmente la camera, consentendo una distribuzione luminosa confinata a uno qualsiasi dei quadranti in cui possiamo immaginare di poter suddividere la stanza con un sistema di assi coordinati, assumendo come origine il centro luminoso stesso;
- Le **interfacce di comando dei singoli apparecchi** sono **differenziate** a seconda dell'accessibilità: per apparecchi standing o task light, il sistema di controllo manuale dovrà essere a bordo dell'apparecchio, mentre per gli apparecchi inaccessibili, il controllo avviene attraverso smartphone o touch-screen alla parete. Dovrà inoltre essere previsto anche un sistema per la trasformazione degli interruttori tradizionali in sistemi in grado di controllare il nuovo sistema di illuminazione;
- L'**apparecchio di illuminazione per il risveglio** deve fornire funzionalità e prestazioni luminose (temperatura di colore e livelli di illuminamento) analoghe ai prodotti di mercato (Figura 39): a questo deve aggiungersi una completa compatibilità con il sistema di controllo dell'illuminazione.

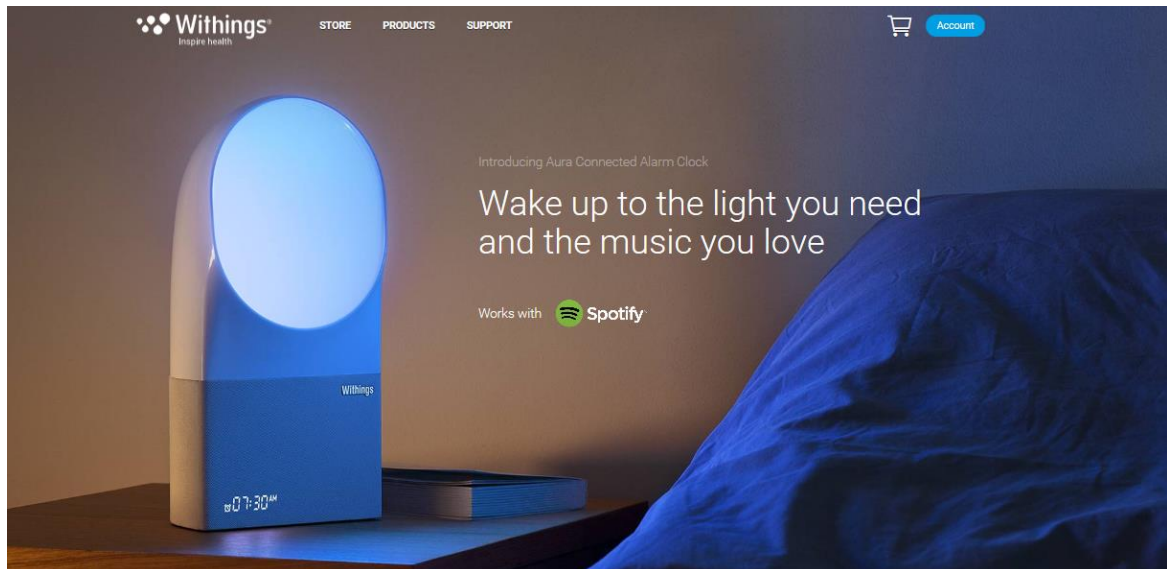


Figura 39 Esempio di lampada per il risveglio disponibile sul mercato

## 2.2 Sistema di controllo

Il sistema di controllo per l'ambito domestico deve essere necessariamente wireless, dato che a differenza di altre tipologie di edifici non è pensabile (ed economicamente sostenibile) ipotizzare un cablaggio per l'intero appartamento.

Si dovrà quindi ipotizzare che ciascun sensore e apparecchio sia collegato wireless al sistema di controllo e che l'alimentazione dei sensori sia fornita da batterie, in modo da garantire la massima flessibilità nella loro disposizione all'interno dell'ambiente. Per tale motivo, il consumo dell'apparato di trasmissione dovrà essere particolarmente contenuto al fine di evitare una troppo frequente manutenzione per la sostituzione delle batterie.

Alcune soluzioni tecnologiche<sup>2</sup> consentono di non utilizzare batterie per i sensori wireless, ricorrendo però a sistemi di generazione e recupero di energia quali pannelli solari, convertitori meccanici di energia elettrica, celle termoelettriche abbinati a convertitori DC/DC che sfruttano una differenza di temperatura per produrre energia elettrica (funzionano solo con dispositivi con consumo in stand-by molto basso come i BLE).



Figura 40 Sistemi per il recupero di energia nelle abitazioni (ENOCEAN)<sup>3</sup>

Si può inoltre ipotizzare che alcuni sensori siano posti all'interno dell'apparecchio (nel caso della sospensione centrale) e per questo motivo non necessitino di una alimentazione a batteria, dato che la possono ricevere dall'apparecchio di illuminazione stesso.

Il **sistema di controllo** svolge le seguenti macro funzioni:

- **Riceve le informazioni dai sensori** presenti nella casa e dall'utente che interagisce attraverso le due modalità descritte in precedenza.

<sup>2</sup> <https://www.enocean.com/en/technology/energy-harvesting/>

<sup>3</sup> <https://www.enocean.com/en/technology/energy-harvesting/>



- **Agisce sugli apparecchi di illuminazione** in funzione delle informazioni ricevute, regolandone la temperatura correlata di colore e l'intensità: il legame tra le informazioni raccolte dai sensori e i destinatari dell'azione di controllo è predefinito, ma completamente modificabile nella fase iniziale di set-up del sistema. Questa flessibilità consente di modificare la risposta luminosa del sistema rendendolo adatto alle diverse configurazioni di installazione ed esigenze specifiche dell'utente.
- **Memorizza per ogni apparecchio due differenti configurazioni predefinite** che contengono le informazioni di temperatura di colore e livello: la prima si applica nelle ore diurne, la seconda nelle ore notturne
- Implementa un **controllo della temperatura di colore degli apparecchi (su base oraria)** in modo da simulare un ciclo circadiano prodotto da luce artificiale: le eventuali azioni degli utenti sui dispositivi di input disabilitano il controllo automatico e fanno passare automaticamente nel preset memorizzato per lo specifico apparecchio. Al termine del ciclo di 24h, il sistema si resetta in modo automatico ritornando al ciclo predefinito: questa opzione deve essere selezionabile anche dall'utente che può definire una delle due modalità a suo piacimento.

### 2.3 Sensori

I **sensori** previsti per il sistema sono di tipi differenti:

- **Sensore di luminosità e temperatura di colore**, installato a contatto con la finestra in modo da valutare ad ogni istante la temperatura di colore della luce naturale e consentire un "aggiustamento" della temperatura di colore prevista per quel dato istante della luce artificiale emessa.
- **Sensori di luminosità e temperatura di colore, installati in diversi punti della casa** che sono utilizzati dal sistema di controllo per regolare l'intensità di flusso luminoso emesso dagli apparecchi della stanza e variarne leggermente la temperatura di colore (che dipende essenzialmente dall'ora della giornata) in funzione del contributo della luce naturale presente. Per questa applicazione è importante scegliere sensori capaci di stimare il valore di irradianza in diverse bande del visibile e della componente IR: in questo modo è possibile valutare la temperatura di colore della luce direttamente incidente/riflessa dalla scena sul sensore, il livello di illuminamento (correzione, anche se approssimativa alla  $V(\lambda)$ ) e la percentuale di questo illuminamento dovuta alla luce artificiale, che non emette nella banda  $IR^4$ , a differenza di quella naturale (Figura 43).

---

<sup>4</sup> Supponendo che l'illuminazione artificiale sia prodotta esclusivamente da sorgenti LED

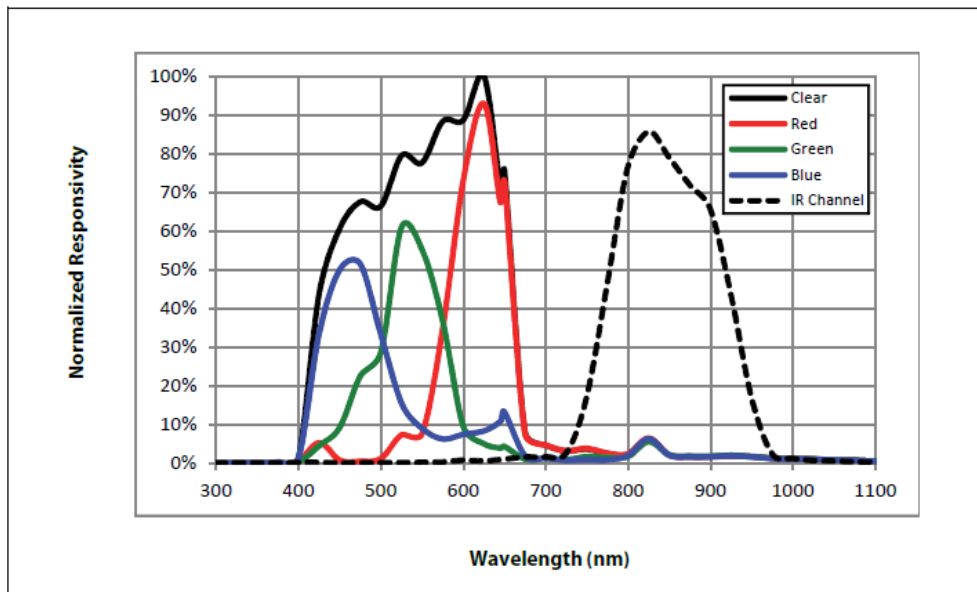


Figura 41 risposta spettrale del sensore TCS3400 Color Light-to-Digital Converter, prodotto da AMS

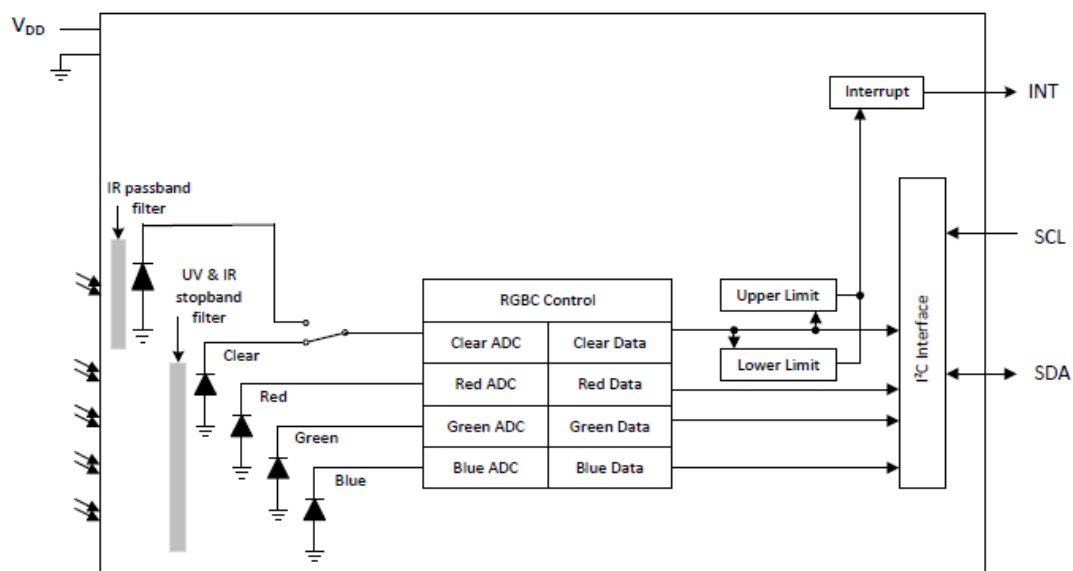
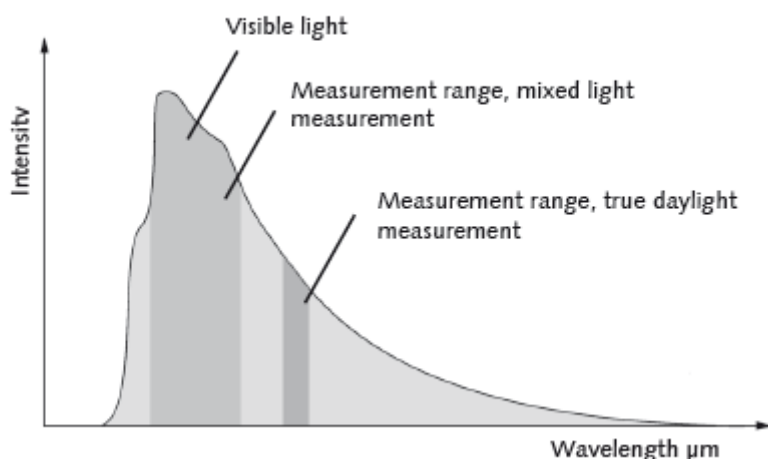


Figura 42 Schema a blocchi del sensore di colore TCS3400 per interfacciamento con sistema a I2C

Il costo di questa tipologia di sensori, sta decrescendo rapidamente, dato che trovano vasta applicazione in smart-phone, table e smath-TV per consentire di regolare la luminosità del display, in modo da ottenere una riduzione dei consumi.

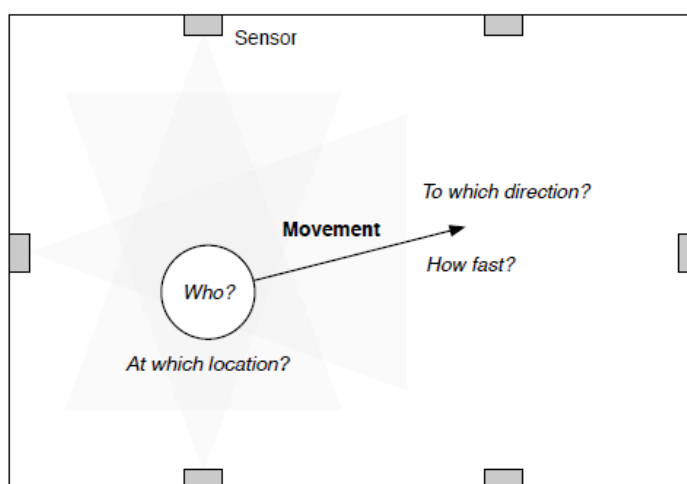


**Figura 43 Meccanismo di misura per la separazione della componente di luce naturale da quella artificiale**

L'utilizzo di sensori indossabili (actigrafi) non è stato considerato utile per almeno tre ragioni: la prima è che sono dispositivi costosi, la seconda è che per funzionare devono essere indossati in modo tale che gli indumenti (es. giacche maglioni o cappotti) non li coprano e la terza è la loro scarsa accuratezza se non precedentemente calibrati<sup>26</sup>. Si tratta quindi di dispositivi più adatti a scopi di ricerca piuttosto che ad applicazioni di tipo commerciale in cui anche il fattore costo riveste una certa importanza.

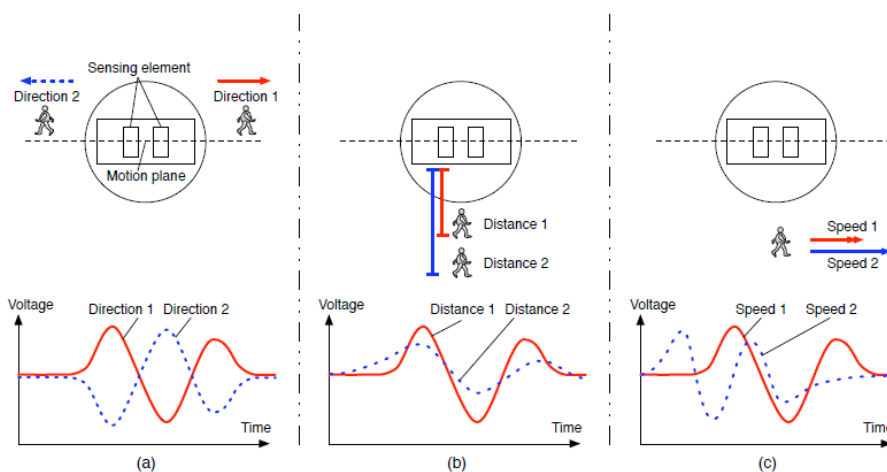
- **Sensori PIR installati in ciascun ambiente**, in numero sufficiente da dividerlo in zone e consentire di valutare la presenza e il movimento in ciascuna di esse. Tali sensori dovranno essere regolabili in sensibilità, offrire diversi angoli di vista per meglio adattarsi alle differenti situazioni di impiego. Se usati in triplette questi sensori possono consentire anche una stima della distanza della persona dal sensore e di classificare la velocità e la direzione di movimento dei soggetti rilevati<sup>27,28</sup>. La Figura 45 mostra lo schema di funzionamento per l'identificazione della posizione, direzione di movimento e velocità basata sulla risposta di tre PIR analogici. La Figura 45 mostra i segnali prodotti da un sensore PIR con due elementi sensibili allineati nel piano del movimento nel caso di persone in movimento: a) segnale di uscita quando si cammina in due direzioni contrarie, b) il segnale di uscita quando si cammina a distanze differenti, c) il segnale di uscita quando si cammina a velocità differenti.

### Human movement detection and identification for indoor person tracking.



**Figura 44 Schema per la rilevazione e identificazione del movimento di persone in ambienti interni**

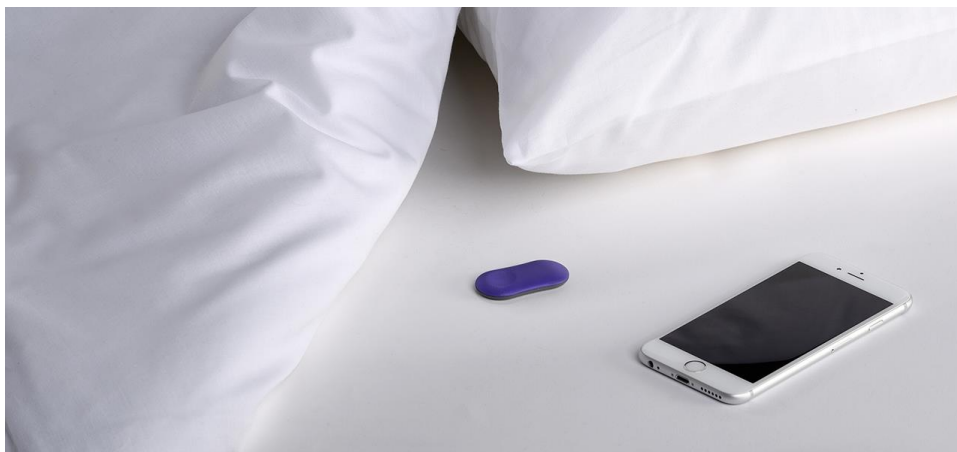
A schematic presentation of a pyroelectric infrared (PIR) sensor with dual sensing elements aligned in a motion plane and its output signal when walking: (a) the output signal in the case of walking in different directions; (b) the output signal in the case of walking at different distances; (c) the output signal in the case of walking at different speed levels.



**Figura 45 Informazioni che è possibile derivare dal segnale di uscita di un sensore PIR con due elementi sensibili allineati nel piano di movimento degli utenti**

- Sensore per il monitoraggio del riposo**, da installare sotto il materasso o sopra il cuscino: lo scopo è quello di valutare la qualità del riposo e di individuare il momento migliore, all'interno di un intervallo predefinito, per svegliare l'utente. Tale sensore si interfaccia direttamente con il telefono su cui è installata un'ideale applicazione con la quale l'utente controlla tutte le funzionalità del sistema come se si trattasse di una normale sveglia. Il sistema per il risveglio si interfaccia anche con il sistema di illuminazione (sfruttando per esempio il protocollo Philips Hue) generando l'alba artificiale al risveglio e spegnendo automaticamente e gradualmente le luci nelle prime fasi di addormentamento. Si è preferito questo tipo di sensore rispetto a quello di actigrafi dedicati ad

applicazioni medicali o sensori indossabili per il benessere<sup>5</sup>, dato che questi dispositivi non consentono normalmente di scambiare informazioni con il sistema di controllo in real-time o se questa funzione è consentita, si ha un notevole consumo della batteria costringendo l'utente a frequenti ricariche. I dispositivi indossabili più versatili dal punto di vista dei consumi, sono anche i più costosi. Un altro punto a sfavore per questa soluzione è la necessità di indossare un dispositivo durante il sonno, condizione che potrebbe non essere accettata da alcuni soggetti.



**Figura 46 Esempio di dispositivo per il monitoraggio del sonno e sveglia**

Nella Figura 46, è mostrato un possibile dispositivo per il monitoraggio del sonno e sistema di sveglia automatica, gestita tramite smart-phone: il sensore blu viene posto sotto il lenzuolo a contatto con il materasso, mentre le funzioni regolazione della sveglia, controllo dell'illuminazione, archiviazione ed altro sono svolte dal telefono, che risulta collegato al sensore attraverso lo standard smart-bluetooth.

La scelta del dispositivo più adatto alla realizzazione della casa circadiana per anziani, dovrà essere guidata da diversi fattori tra i quali:

- Prezzo del sistema di monitoraggio
- Semplicità di utilizzo e di installazione
- Facilità di interfacciamento con il sistema di gestione dell'illuminazione della camera da letto: per questo punto è fondamentale che il produttore del sensore renda disponibili delle API/SDK per smartphone con le quali accedere alle funzionalità del dispositivo<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Esistono dei dispositivi con sistema operativo Android che forniscono delle API per la programmazione di funzioni speciali, come nel nostro caso.

<sup>6</sup> Alcuni produttori rendono disponibili soltanto gli strumenti per l'accesso ai server remoti con i quali il dispositivo sincronizza i dati di misura. Per l'accesso è necessaria una registrazione del prodotto sul sito del produttore che consente di ottenere due chiavi di accesso, la prima relativa al proprietario del dispositivo, la seconda relativa al suo utilizzatore. Solo disponendo di queste due chiavi di accesso è possibile autenticarsi sul server remoto e avere accesso ai dati misurati dallo sleep-tracker.



Figura 47 Altro dispositivo per il monitoraggio del sonno e sveglia (<http://www.beddit.com/sleeptracker>)



Figura 48 Altro dispositivo per il monitoraggio del sonno e sveglia (<https://www.ifit.com/sleephr>)

Una possibile soluzione alternativa è quella fornita dagli sleep tracker indossabili, come quello mostrato alla Figura 49, che consente il monitoraggio del sonno e una elevata capacità di personalizzazione dell'Applicazione su smart-phone con la quale il tracker comunica<sup>7</sup>. Questa alternativa consente di risolvere il problema dell'accesso ai dati, ma presenta le due criticità già evidenziate in precedenza.

<sup>7</sup> Il produttore mette a disposizione uno strumento di sviluppo gratuito, scaricabile all'indirizzo <https://jawbone.com/up/developer/>





Figura 49 Sleep Tracker JawBone UP3

- **Sensori basati su matrici/array di termopile** da utilizzarsi in combinazione/alternativa ai PIR che consentono di localizzare le persone all'interno di un ambiente mediante la misura di temperatura in differenti zone di quest'ultimo, le cui dimensioni variano a seconda dell'angolo di vista del sensore impiegato (Figura 50). Questo tipo sensori consente di rilevare la presenza di persone che sono immobili all'interno di un ambiente evitando complesse elaborazioni, come nel caso di sensori PIR passivi<sup>29</sup>.

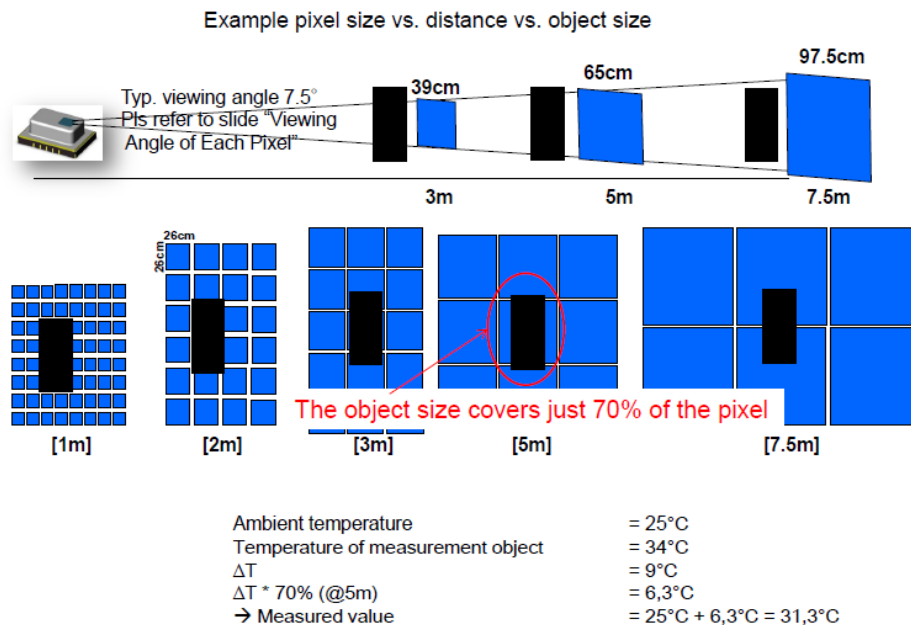


Figura 50 Legame tra dimensione del pixel, distanza e dimensione dell'oggetto rilevato

Di norma, la rilevazione delle persone all'interno della scena inquadrata dal sensore avviene attraverso la sottrazione dell'immagine di background, secondo uno schema che può assumere anche una certa complessità, come mostrato alla Figura 51.

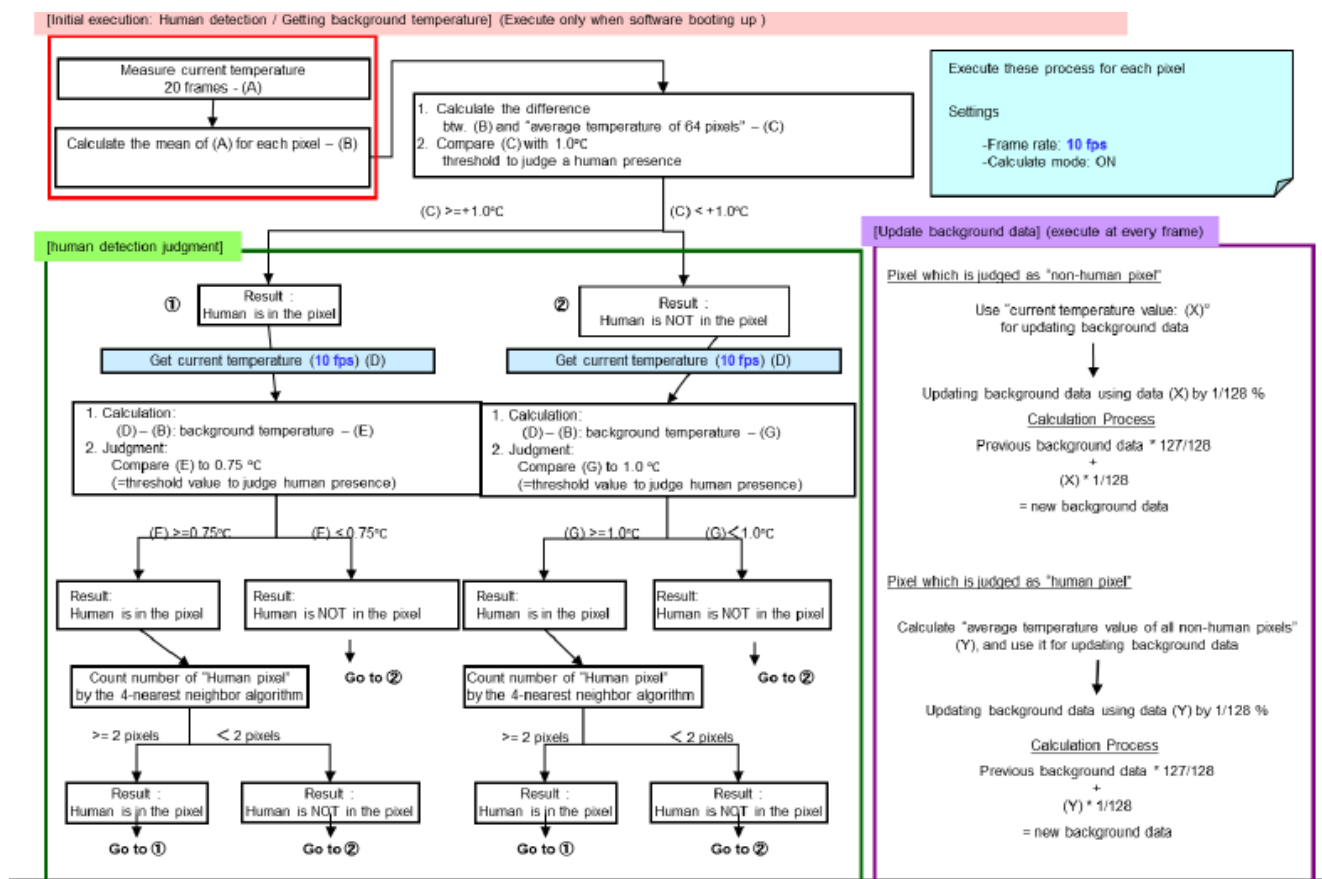


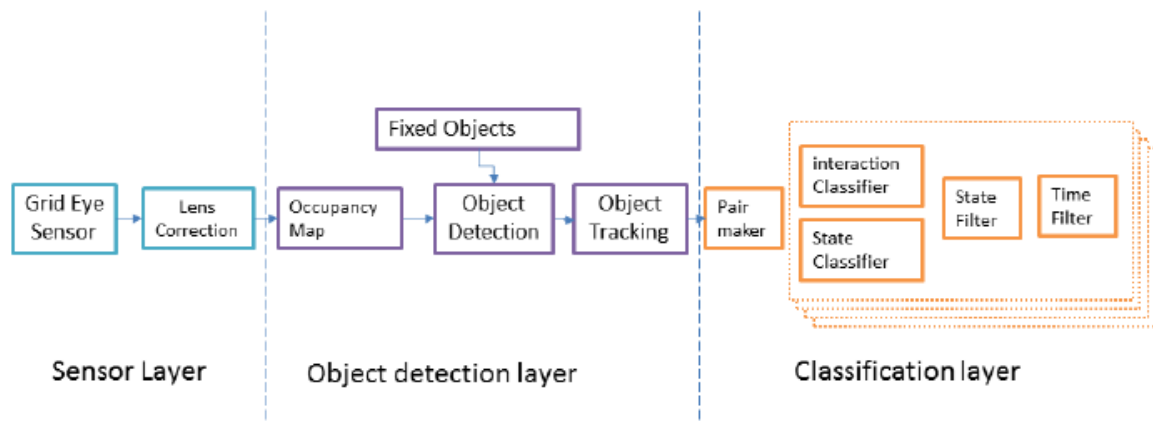
Figura 51 Flow chart per l'identificazione degli utenti e la sottrazione dell'immagine di background<sup>8</sup>

I sensori possono essere equipaggiati anche con sistemi ottici per adattare il FOV del sensore all'applicazione: si può infatti immaginare che in ambienti differenti della casa, come il soggiorno o la camera da letto sorga la necessità di monitorare zone di dimensioni molto differenti tra loro.

Questi sensori sono di solito utilizzati nei sistemi di climatizzazione per l'orientamento delle alette per il controllo dei flussi d'aria, come mostrato nella Figura 54, e possono essere vantaggiosamente utilizzati per il riconoscimento della posizione o i movimenti dell'utente all'interno di un locale<sup>30</sup>, primo passo per il riconoscimento delle attività svolte<sup>31</sup>.

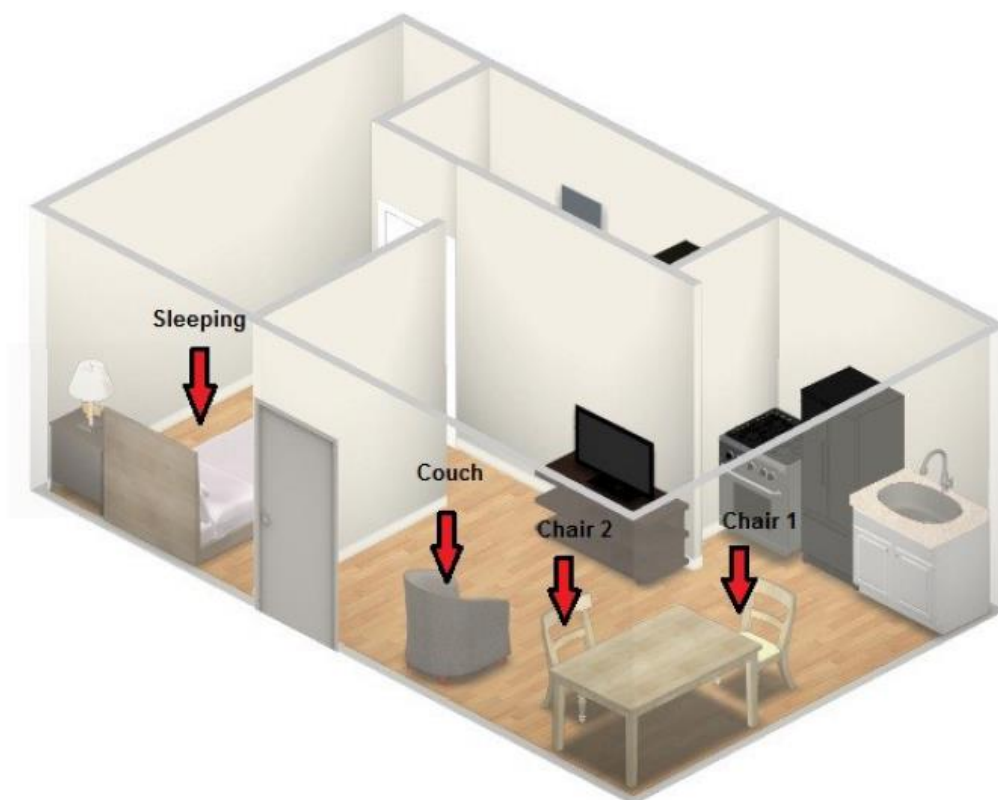
La nuova generazione di termopile organizzate in matrici rende possibile il riconoscimento di oggetti e interazioni tra gli oggetti-occupanti attraverso l'analisi dei loro modelli di calore, riuscendo a riconoscere un discreto numero di differenti attività, utilizzando una singola installazione del sensore. Lo schema di elaborazione delle informazioni è riportato alla Figura 52 ed è costituito da tre moduli principali: Sensor Layer, Object detection layer, Classification layer.

<sup>8</sup> Panasonic Application Notes, Grid-Eye Characteristics, Panasonic Automotive & Industrial Systems Europe



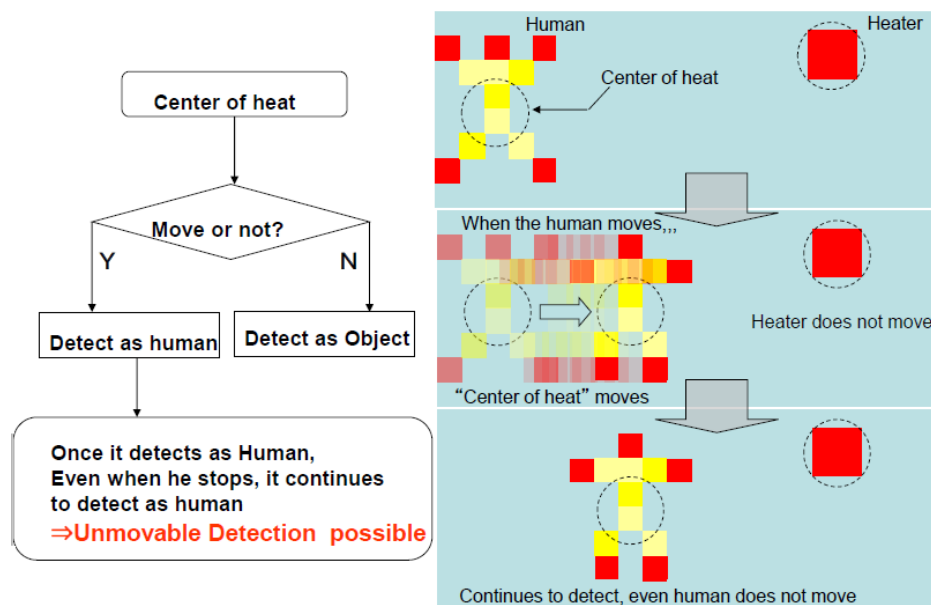
**Figura 52 Schema dettagliato dell'architettura del sistema di elaborazione utilizzato per processare l'immagine della matrice di termopile**

Nella nostra applicazione possiamo immaginare di disporre un certo numero di questi sensori all'interno della casa in modo da ottenere un riconoscimento automatico di alcune attività quotidiane svolte dagli occupanti, come ad esempio il riposo nella camera da letto, il rilassamento sul divano di fronte alla televisione, il pranzo o la cena, riuscendo a discriminare persino la posizione dell'utente rispetto al tavolo.



**Figura 53 Applicazione del riconoscimento delle attività all'interno dell'abitazione<sup>9</sup>**

<sup>9</sup> Dharmendra Chandrashekar Kallur, "Human localization and activity recognition using distributed motion sensors", Bachelor of Engineering in Electronics and Communication Visvesvaraya Technological University Belgaum, Karnataka 2010



**Figura 54 Esempio di applicazione dei sensori basati su array/matrici di termopile per il controllo del flusso dell'aria negli impianti di condizionamento dell'aria<sup>10</sup>.**

- **Contapassi** da realizzare per mezzo dell'accelerometro posto all'interno dello smart-phone: attraverso questo parametro è possibile effettuare una stima dell'attività fisica dell'utente<sup>32</sup> e della probabilità che sia stato esposto alla luce solare: se l'attività fisica è stata di basso livello è possibile che il soggetto non sia uscito di casa e che quindi non abbia ricevuto una corretta stimolazione del sistema circadiano (specialmente nelle stagioni autunno-inverno), che potrà essere compensata, entro certi limiti, dalla regolazione del sistema di illuminazione domestico. L'utilizzo del contapassi attraverso smart-phone ci fornisce anche delle informazioni supplementari: se assumiamo come valida la relazione tra una elevata attività fisica e una esposizione alla luce solare, possiamo anche associare a questa stimolazione un'informazione temporale. Se ad esempio la stimolazione è avvenuta nel tardo pomeriggio (post ore 18.00) di primavera o estate, il sistema di illuminazione potrà modificare la temperatura di colore delle sorgenti verso toni più caldi per favorire il riposo notturno.

## 2.4 Il sistema CASAMBI

Il Bluetooth Low Energy, chiamato anche Bluetooth 4.0 +, Bluetooth intelligente o semplicemente BLE è stato originariamente progettato da Nokia prima di essere adottato dal Bluetooth Special Interest Group (SIG) e pubblicato nel 2010 come standard.

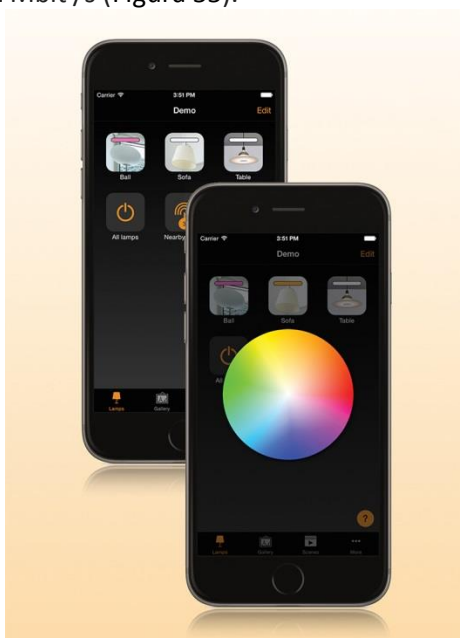
Il basso consumo di questi dispositivi, li rendono adatti a funzionare con piccole batterie a bottone o altri sistemi di recupero o generazione di energia. Inoltre le loro ridotte dimensioni, offrono ai progettisti ampie possibilità di impiego nel controllo dell'illuminazione wireless.

<sup>10</sup> Grid-Eye Characteristics, Panasonic Automotive & Industrial Systems Europe



**Figura 55 Doppio protocollo implementato nel sistema CASAMBI: smart blue-tooth protocol per interfacciarsi con gli smart-phone, tablet, smart-watch e un protocollo mesh proprietario per il controllo dei singoli apparecchi/sensori che costituiscono la rete**

Le funzioni di interfaccia utente della piattaforma CASAMBI sono accessibili usando lo Smart Bluetooth (Bluetooth a basso consumo energetico): il protocollo consente di controllare e configurare il sistema da qualsiasi smart-phone o dispositivo mobile, utilizzando un'interfaccia grafica intuitiva. Per la comunicazione inter-dispositivo, il sistema utilizza una mesh wireless proprietaria, con un protocollo che trasporta i pacchetti con comandi e stato dei dispositivi tra i diversi apparecchi di illuminazione e lampade, raggiungendo una velocità fino a 2 Mbit/s (Figura 55).

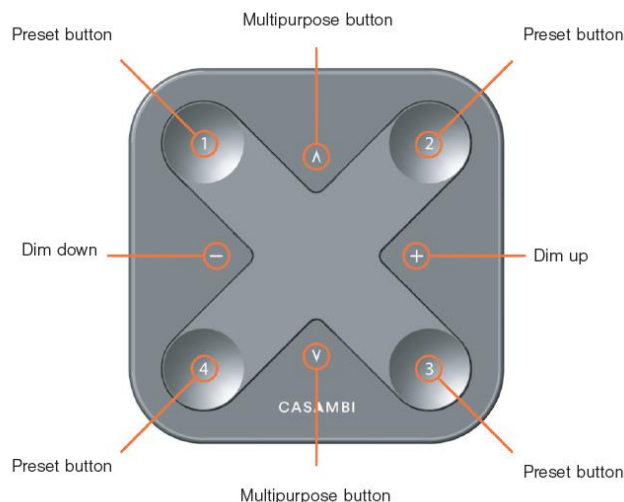


**Figura 56 Applicazione per sistema operativo Android o MAC OS-X sviluppato da Casambi**

Il Bluetooth Low Energy è stato pensato per l'implementazione dell'**Internet of Things** (IoT) e questa tecnologia è implementata in smartphone e tablet dall'inizio del 2012. Questo significa che nessun modulo gateway o altro tipo di dongle sono necessari per controllare l'illuminazione via BLE: questa caratteristica rende i sistemi di controllo dell'illuminazione basati su BLE la soluzione più conveniente rispetto alle soluzioni costruite su altre tecnologie wireless.

Sulla base delle specifiche del Bluetooth Low Energy, Casambi ha sviluppato una rete mesh proprietaria dove tutta l'intelligenza del sistema è replicata in ogni nodo e in tal modo crea un sistema senza punti di guasto. Questa tecnologia consente anche aggiornamenti del firmware e la configurazione dei parametri tramite la rete stessa (over-the-air) e in questo si riducono i costi e i tempi di installazione e manutenzione. In questo tipo di architettura completamente distribuita e simmetrica, qualsiasi unità può andare offline e riconnettersi alla rete non appena il dispositivo ritorna di nuovo online. La connessione internet viene utilizzata dal sistema soltanto per la configurazione di smart-phone e tablet, attraverso un servizio sul cloud (Figura 56).

Tutti i prodotti della famiglia Casambi formano automaticamente una rete wireless mesh, in cui l'illuminazione può essere controllata tramite diversi dispositivi, come ad esempio smartphone, tablet, smart-watch, pulsanti, interruttori o Wall Switch Wireless di Casambi (Figura 57).



**Figura 57 Xpress is a wireless user interface**

Il sistema consente anche di trasformare un vecchio interruttore a muro in un controllo intelligente, attraverso l'aggiunta di un modulo BLE.

Con questo sistema è dunque possibile:

- Regolare l'intensità degli apparecchi di illuminazione
- Riunire gli apparecchi in gruppo
- Configurare, salvare e richiamare scene
- Configurare, salvare e richiamare le animazioni
- Impostare un programma per richiamare scene o animazioni in base a data e ora
- Regolare i colori (apparecchi o lampade RGB)
- Regolare temperature di colore
- Impiego di sensori di movimento
- E' possibile scattare una foto degli spazi e aggiungere il controllo dell'illuminazione direttamente alla foto (si tratta di un aiuto nella fase di configurazione del sistema dove occorre disporre i sensori, definire il legame tra il sensore e l'apparecchio di illuminazione controllato)
- Considerare nella programmazione l'ora di alba e tramonto
- Ottenere in ogni momento tutte le informazioni sullo stato del sistema
- Aggiornare il firmware over-the-air

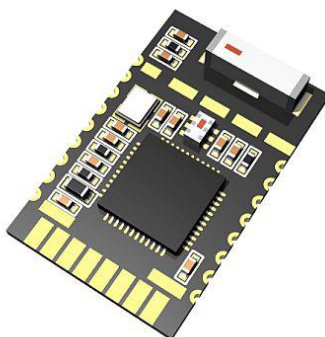
I dispositivi di alimentazione dei LED da inserire nell'apparecchio di illuminazione possono incorporare direttamente il modulo BLE, o essere due elementi separati che comunicano tra loro attraverso interfaccia analogica 0-10 V o 1-10V o interfaccia digitale DALI (Figura 58).





**Figura 58 Wireless control unit da utilizzare in associazione a un LED driver con controllo analogico o digitale (DALI)**

Se si desidera creare un sistema di illuminazione complesso compatibile con Casambi, è possibile utilizzare un modulo bluetooth 4.0 con a bordo il firmware pre-programmato, che può essere facilmente incorporato in una scheda elettronica personalizzata.



**Figura 59 Modulo Bluetooth pre-programmato con il firmware Casambi per lo sviluppo di soluzioni elettroniche personalizzate**

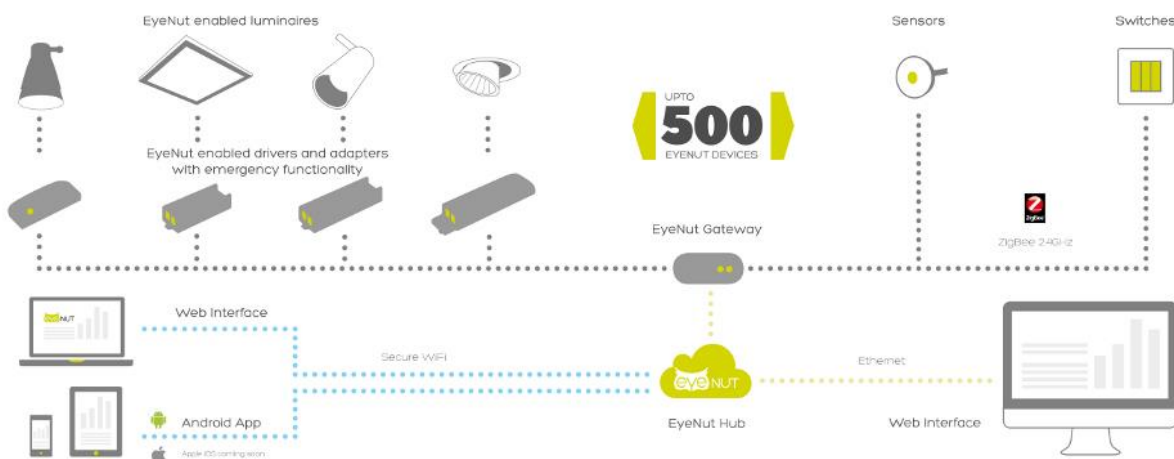
## 2.5 Il sistema EyeNut

EyeNut è un sistema di controllo e monitoraggio senza fili per l'illuminazione interna che offre agli utenti il controllo completo della loro illuminazione, la riduzione del consumo di energia: questo sistema è già stato descritto in dettaglio nello sviluppo di precedenti applicazioni (uffici)<sup>11</sup>.

Lo schema di funzionamento del sistema di controllo è riportato alla Figura 60: attraverso un solo gateway è possibile gestire fino a 500 dispositivi attraverso una rete robusta e sicura basata su ZigBee. Non esiste un limite al numero di gateway che è possibile collegare e quindi al numero di dispositivi che è possibile controllare e gestire. Il sistema consente inoltre di controllare più siti e gestire l'accesso di utenti multipli. Il gateway può essere posizionato in situ oppure installato e gestito sul cloud da parte di Harvad.

L'interfaccia tra il sistema di trasmissione radio e il LED driver può essere di tipo analogico o digitale (DALI), oppure i due dispositivi possono essere integrati in un solo componente. Il sistema consente anche di interfacciare sensori di occupazione (presenza/assenza), di luce diurna e di trasformare un interruttore tradizionale o un sensore capacitivo da installare sulla parete in un dispositivo di comando wireless. Dato il quantitativo limitato di punti luce in un contesto domestico (massimo 24 secondo le statistiche europee), questo sistema di controllo risulta sovradimensionato per la specifica applicazione.

<sup>11</sup> <http://www.eyenut.co.uk/whatiseyenut/howitworks.html#topnav>

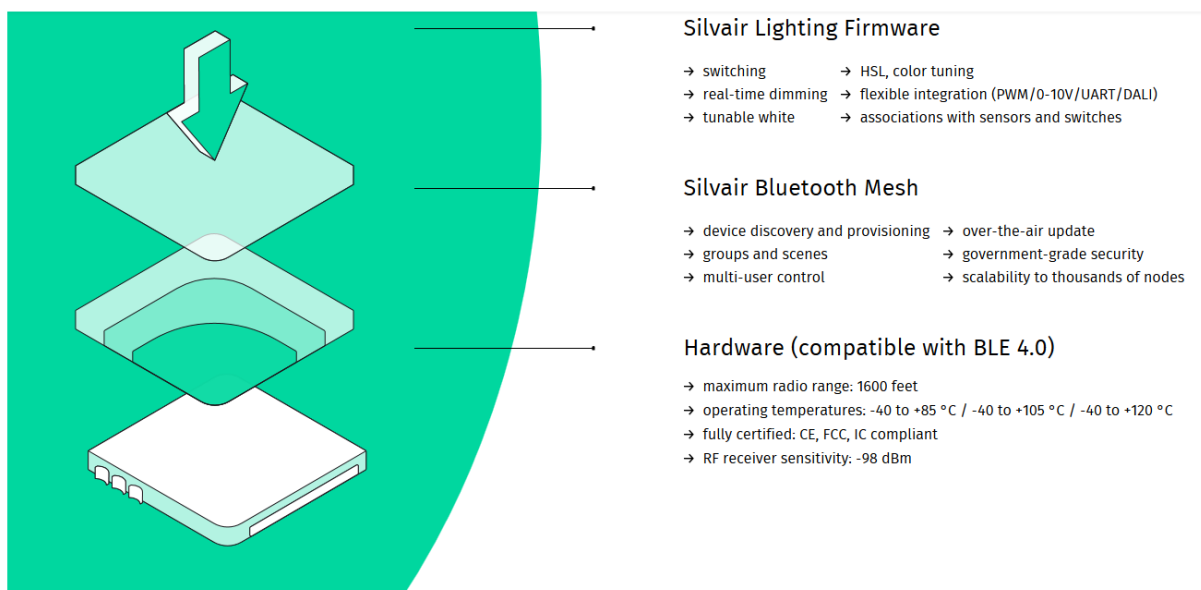


**Figura 60 Schema del sistema di gestione EyeNut prodotto da Harvard**

## 2.6 Il sistema SILVAIR<sup>12</sup>

Si tratta di un prodotto simile al precedente, anch'esso dedicato alla gestione sistemi di illuminazione in applicazioni professionali, come ad esempio spazi commerciali e uffici.

Anche in questo caso esiste un doppio protocollo, uno per la connessione ai dispositivi smart-phone e un secondo per l'interconnessione di tutti gli apparecchi di illuminazione, attraverso una mesh bluetooth<sup>13</sup>.



**Figura 61 Schema riassuntivi delle principali caratteristiche tecniche del sistema Silvoir**

Consideriamo ora come funziona l'estensione della maglia. Ci sono due tipi di comunicazione all'interno di una rete Silvoir Mesh: centrali-periferico e periferici-periferico. Una volta che la rete mesh viene creata, non vi è alcuna necessità di ulteriori comunicazioni centro-periferia.

I dispositivi centrali sono di solito gli smartphone e tablet e solitamente eseguono il software di controllo. I dispositivi centrali vengono utilizzati per configurare e gestire la rete, ma possono anche essere utilizzati per eseguire un aggiornamento del software dei dispositivi periferici. I dispositivi centrali si collegano a periferiche che utilizzano i servizi del GATT standard di smart-Bluetooth. Mentre questo tipo di connessione è pienamente compatibile con Bluetooth 4.0, il sistema impiega alcune tecniche proprietarie per consentire

<sup>12</sup> Le informazioni relative a questo sistema di controllo sono state tratte dall'articolo di Marek Wierzbicki, "Bluetooth Mesh - What's that noise about? (MAGAZINE)", LEDs magazine, March 29, 2016

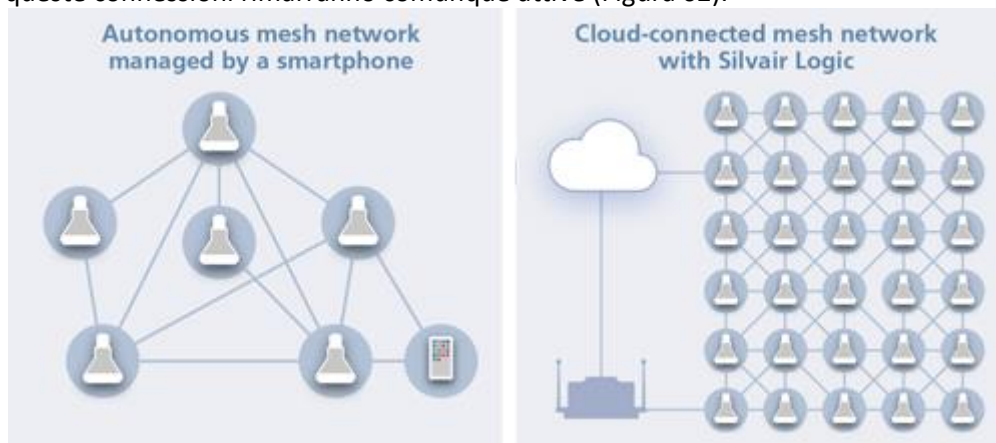
<sup>13</sup> <https://silvoir.com/>

il controllo contemporaneo di più di otto periferiche (otto è il limite per lo standard Bluetooth 4.0) da parte di molti smartphone utilizzati contemporaneamente.

I dispositivi periferici sono i nodi di una rete mesh. L'implementazione di una rete robusta deve consentire alle periferiche di comunicare tra loro e di agire come relè che passano i messaggi attraverso le maglie. Si tratta di un cambiamento radicale rispetto dell'architettura originale dello smart-Bluetooth e permette il controllo di interi gruppi di dispositivi che utilizzano multicast (uno a molti) di comunicazione - ad esempio, accensione/spengimento di un gruppo di apparecchi in un corridoio. L'implementazione Silvoir Mesh consente un massimo di 63 collegamenti, che permette di coprire in modo semplice aree molto estese, a differenza di altre tecnologie che richiedono la creazione di reti più complesse o più costose.

Uno dei concetti più significativi introdotti nell'implementazione di Silvoir è la comunicazione senza connessione, il che significa che ogni periferica può rendere pubblico il proprio stato nella rete. Come risultato, luci, ventilatori, sistemi di ombreggiatura, e qualsiasi altro dispositivo abilitato della rete vengono visualizzati automaticamente nell'applicazione sul dispositivo centrale, non solo come un semplice elenco di dispositivi disponibili, ma con parametri molto specifici che possono essere controllati dall'utente - ad esempio, on/off, il colore, la temperatura, la velocità della ventola o posizione ombra. Ogni cambiamento di stato fatto dall'utente viene immediatamente reso pubblico sulla rete ed ogni dispositivo di controllo nella maglia viene aggiornato istantaneamente con il nuovo stato.

Piccole reti fino a circa 30 dispositivi possono essere implementate e gestite utilizzando solo l'applicazione su uno smartphone o un tablet. La natura plug-and-play di Bluetooth, e il fatto che il protocollo è nativamente supportato da quasi tutti gli smartphone e tablet sul mercato, rende l'intero processo estremamente semplice ed intuitivo. L'applicazione rileva e visualizza i dispositivi Bluetooth nelle sue vicinanze. L'utente crea una rete mesh selezionando quali dispositivi devono essere aggiunti e dando alla rete un nome. Una volta aggiunti alla rete tutti i dispositivi desiderati, le associazioni e le relazioni tra i dispositivi possono essere configurate a seconda delle differenti esigenze. Lo smart-phone può essere spento ma queste connessioni rimarranno comunque attive (Figura 62).



**Figura 62 Il sistema Silvoir supporta sia reti con un ridotto numero di nodi, in cui il controllore è costituito da uno smart-phone e reti con un numero elevato di nodi, in cui il controllore è una server dedicato**

Le reti di oltre 30 dispositivi, o quelli che richiedono associazioni più sofisticate, scenari, e servizi di monitoraggio di rete, si ottengono ricorrendo a server dedicati a cui demandare l'azione di controllo.

Il software di controllo implementa quattro livelli di autorizzazioni:

- 1) Administrator: possono comandare tutti i dispositivi all'interno della rete, così come configurare e gestire le autorizzazioni di altri utenti;
- 2) family: in grado di operare su tutti i dispositivi all'interno della rete, ma non di configurarli o gestirli;
- 3) client: ha il permesso limitato ad operare su dispositivi selezionati all'interno della rete;
- 4) AdHoc: può operare dispositivi comuni solo su base uno-a-uno (senza accesso alla rete mesh).

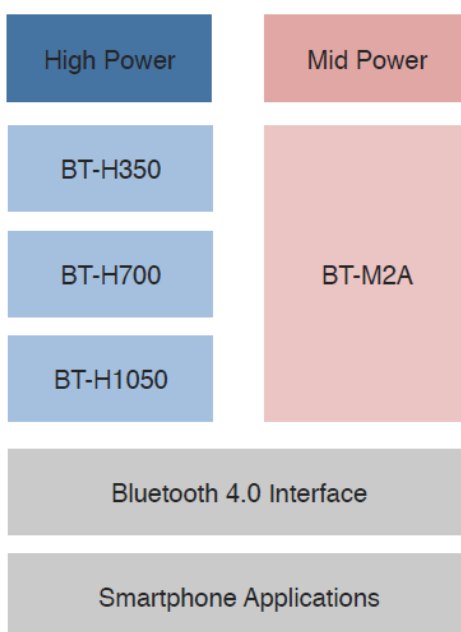
Allo stesso modo, ci sono 3 differenti livelli di sicurezza con cui i dispositivi inviano le informazioni sulla rete: factory default che corrisponde allo stato in cui il dispositivo esce dalla fabbrica ed è pronto all'uso; private (le informazioni e funzioni sono crittografate e solo i possessori della chiave possono averne accesso

e controllare il dispositivo stesso); pubbliche in cui le informazioni sullo stato, così come le funzioni di controllo, non sono criptate e possono essere accessibili da chiunque.

## 2.7 Il sistema LUMEDO

Lumedo<sup>14</sup> offre un controller/driver per LED studiato per interfacciarsi con Iphone, Ipad, basato sulla tecnologia Bluetooth low energy. I prodotti disponibili sono distinti in due categorie:

- Controller per mid-power LED molto utilizzati nelle applicazioni domestiche, sotto forma di barre e moduli alimentati a tensione costante di 12-24V;
- Controller per power LED che garantiscono valori di flusso per singolo emitter più elevati rispetto ai precedenti.



**Figura 63 Prodotti Lumedo per interfacciamento di Iphone e Ipad con dispositivi di illuminazione**

Ciascun controller dispone di 5 canali, con la possibilità di integrare nella stessa rete fino a 5 controller distinti: la comunicazione con i dispositivi smart avviene attraverso il protocollo Bluetooth 4.0.

La parte più interessante del prodotto è l'interfaccia dell'applicazione, che consente diverse funzionalità:<sup>15</sup>

- Controllo colore della luce e della tonalità del bianco (Control Wheels)
- Controllo della luminosità (Control Wheels)
- Sveglia con possibilità di alba artificiale (graduale aumento dell'intensità della luce) con luce di tonalità calda
- Possibilità di definire delle variazioni dei parametri di illuminazione in funzione dell'ora della giornata
- Funzione Not@home per l'accensione e lo spegnimento casuale delle luci nelle diverse stanze per simulare la presenza di persone in casa quando questa rimane vuota per lungo tempo.
- Controllo della luce attraverso l'impostazione di un timer
- 3 effetti di luce predefiniti : fireplace, color,changer, cloudy sky

<sup>14</sup> <http://www.lumedo.com/product/>

<sup>15</sup> [http://www.lumedo.com/wp-content/uploads/2013/08/BROCHURE\\_LUMEDO\\_ENG.pdf](http://www.lumedo.com/wp-content/uploads/2013/08/BROCHURE_LUMEDO_ENG.pdf)

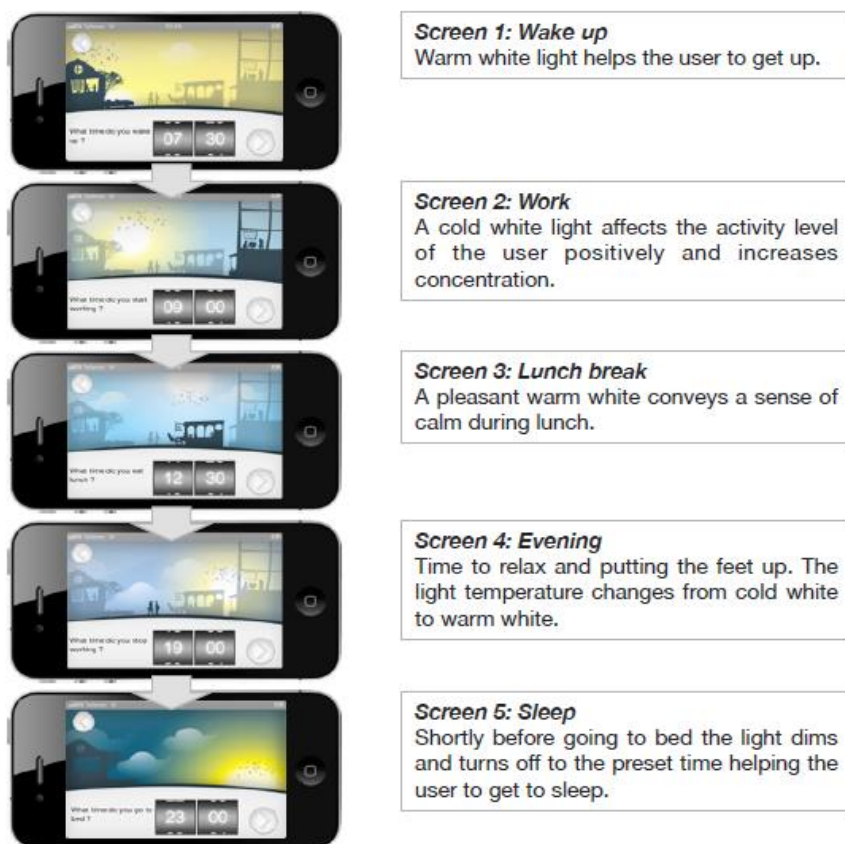
- 4 slot preimpostati per la memorizzazione delle scene di luce preferite dall'utente
- Controllo automatico dell'accensione dell'apparecchio in presenza/vicinanza dello smart-phone ("Accensione Automatica")
- Raggruppamento e il controllo di più sorgenti
- Collegamento sicuro e semplice tra controller e applicazione sul telefono
- Estensioni per ulteriori effetti di luce e funzioni attraverso update scaricabili dallo store on-line

La Figura 64 mostra l'interfaccia con cui l'utente può controllare le singole funzioni di ciascuna lampada, come ad esempio l'accensione e lo spegnimento, il controllo del livello dell'illuminazione o della temperatura di colore e altre funzioni.



**Figura 64 Interfaccia utente di LUMEDO**

Ciò che rende differente questo sistema dai precedenti è la possibilità di realizzare in modo semplice un controllo "circadiano" della propria illuminazione domestica, modificando intensità e temperatura di colore nell'arco delle diverse ore della giornata (Figura 65).



**Figura 65 Programmazione circadiana dell'illuminazione mediante il sistema LUMEDO**

## 2.8 Sistemi Custom

Tutti i sistemi presentati nei precedenti paragrafi sono proprietari e quindi chiusi: non è possibile inserire un sensore o dispositivo differente da quelli originariamente previsti, fatto salvo chiedere una personalizzazione del sistema al costruttore.

Di norma questa limitazione non impatta molto sulle funzionalità dei sistemi di controllo dato che sono stati pensati e ottimizzati per applicazioni professionali specifiche per le quali le esigenze degli utenti e i costi di realizzazione sono stati chiaramente valutati nella fase di studio del sistema.

L'applicazione in ambienti domestici, pone però due importanti temi di riflessione:

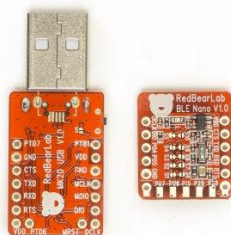
- Il sistema deve essere fortemente personalizzabile e adatto alle particolari esigenze degli anziani
- Il sistema deve essere economico e flessibile, dato che l'installazione può avvenire in contesti molto diversi, per i quali è difficile una standardizzazione

Per questo motivo, al fine di realizzare un prototipo di studio, potrebbe essere interessante utilizzare degli ambienti di sviluppo e dei demo kit, messi a punto da alcuni produttori di IC che consentono di ottenere la flessibilità richiesta ad un costo contenuto<sup>16</sup>.

Tra i molti produttori, ne sono stati individuati tre, che offrono soluzioni più o meno equivalenti dal punto di vista tecnico e che rendono disponibile ampia documentazione e materiale di esempio:

- Nordic nRF 51822<sup>17</sup>
- Texas Instruments CC254X<sup>18</sup>
- CSR CSR1010

Tutti i produttori offrono un firmware che supporta la creazione di una mesh Bluetooth, ambiente di sviluppo e di debug, codice di esempio per smart-phone e tablet dotati di sistema operativo Android o MAC OS-X. Negli store<sup>19</sup> sono disponibili demo-kit (Figura 66) che, ad un costo contenuto, consentono di sperimentare le funzionalità dei diversi dispositivi: questi kit potrebbero essere anche utilizzati per realizzare il prototipo di studio che servirà a mettere a punto le diverse funzionalità del sistema di illuminazione per anziani.



**Figura 66 Interfaccia USB per la programmazione (sinistra) e modulo BLE Nordic nRF 51822 (destra)**

Sono di recente comparse sul mercato a costi contenuti schede di prototipazione (Genuino 101<sup>20</sup>) con potenze di calcolo significative, che incorporano alcuni di questi IC (Nordic nRF51822) e altre interessanti periferiche come accelerometri a 6 assi e Real Time Clock molto utili per la realizzazione di interfacce utente (tap & double tap) e produrre comportamenti differenti nell'arco della giornata (es. modifica della temperatura di colore).

<sup>16</sup> Si veda ad esempio nRF5 SDK for HomeKit scaricabile all'indirizzo :

<http://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-Smart-Bluetooth-low-energy/nRF5-SDK-for-HomeKit>

<sup>17</sup> Lo stesso IC è usato nel sistema CASAMBI

<sup>18</sup> Lo stesso IC è usato nel sistema SILVAIR

<sup>19</sup> Per esempio CSR mette offre un demo kit nel suo store on-line: <http://www.csr.com/products/csrmesh-development-kit>

<sup>20</sup> <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoard101>





**Figura 67 Sistema di prototipazione Genuino 101 basato su micro Intel Curie**

Sfruttando queste schede, il progetto dell'hardware richiesto sarebbe limitato alle interfacce verso il LED driver (analogica o digitale) mentre dal punto di vista software, sarebbe sufficiente personalizzare ed estendere uno degli esempi proposti dal produttore stesso del modulo di comunicazione.

### 3 Allegati

“B.1 Allegato.pdf” presentazione dell'attività B1

### 4 Referenze bibliografiche

- <sup>1</sup> C. Chain, D. Dumortier, M. Fontoynt. A comprehensive model of luminance, correlated colour temperature and spectral distribution of skylight: comparison with experimental data. *Solar Energy* Vol. 65, No. 5, pp. 285–295, 1999
- <sup>2</sup> Irwin G. Priest, A proposed scale for use in specifying the chromaticity of incandescent illuminants and various phases of daylight. *JOSA*, vol. 23, n° 2, febbraio 1932, pp. 41–45, DOI:10.1364/JOSA.23.000041
- <sup>3</sup> Lukas Hosek, Alexander Wilkie. An Analytic Model for Full Spectral Sky-Dome Radiance. *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2012*
- <sup>4</sup> Lukas Hosek, Alexander Wilkie. Adding a solar-radiance function to the Hošek-Wilkie skylight model. *IEEE Comput Graph Appl.* 2013 May-Jun;33(3):44-52. doi: 10.1109/MCG.2013.18.
- <sup>5</sup> J Mardaljevic, M. Andersen, N. Roy and J Christoffersen (2014) A framework for predicting the non-visual effects of daylight – Part II: The simulation model in *Lighting Res. Technol.* 2014; Vol. 46: 388–406 doi:10.1177/1477153513491873
- <sup>6</sup> Javier Hernandez-Andre's, Javier Romero, and Juan L. Nieves. Color and spectral analysis of daylight in southern Europe, Vol. 18, No. 6/June 2001/ *J. Opt. Soc. Am. A*
- <sup>7</sup> M Andersen, J Mardaljevic and SW Lockley (2012) A framework for predicting the non-visual effects of daylight - Part I: photobiology- based model in *Lighting Res. Technol.* 2012; 44: 37–53 DOI: 10.1177/1477153511435961
- <sup>8</sup> Inanici M, Brennan M, Clark E. (2015) Spectral daylighting simulations: computing circadian light presented at Conference: International Building Performance Simulation Association 2015 Conference, At Hyderabad, India
- <sup>9</sup> Matěj B. Kobav, Grega Bizjak. “Development of a substitutive light source for indoor daylight calculation”. *Building and Environment* 400 (2005) 1611-1618
- <sup>10</sup> EDWARD YAN-YUNG NG, LAM KHEE POH, WU WEI, and TAKEHIKO NAGAKURA ( )Advanced lighting Simulation in Architectural Design in the Tropics *Caadria in Automation in Construction* Volume 10, Issue 3, March 2001, Pages 365–379 doi:10.1016/S0926-5805(00)00053-4
- <sup>11</sup> S@tel-Light, [www.satel-light.com](http://www.satel-light.com) accesso Aprile 2016
- <sup>12</sup> Wandachowicz K. (2006) Calculation of the circadian illuminance distribution with Radiance, accesso 2016 [http://www.radianceonline.org/radianceworkshop5/2006\\_Radiance\\_Workshop/Presentations/Wandachowicz2\\_RW2006.pdf](http://www.radianceonline.org/radianceworkshop5/2006_Radiance_Workshop/Presentations/Wandachowicz2_RW2006.pdf)
- <sup>13</sup> Jose M. Artigas; Adelina Felipe; Amparo Navea; Adriana Fandiño; Cristina Artigas (2012) Spectral Transmission of the Human Crystalline Lens in Adult and Elderly Persons: Color and Total Transmission of Visible Light *IN Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2012;53(7):4076-4084. doi:10.1167/iovs.12-9471

- <sup>14</sup> MS Rea, MG Figueiro, A Bierman, R Hamner. 2012 Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system. *Lighting Res. Technol.* 2012;44: 386–396
- <sup>15</sup> Rea MS, Figueiro MG (2013) A Working Threshold for Acute Nocturnal Melatonin Suppression from “White” Light Sources used in Architectural Applications. *J Carcinogene Mutagene* 4: 150. doi:10.4172/2157-2518.1000150
- <sup>16</sup> Gall D. 2004. “Definition and Measurement of Circadian Radiometric Quantities”, CIE Symposium on Light and Health: Non-Visual Effects. Vienna, Austria.
- <sup>17</sup> Lucas R., Peirson S., Berson D., Brown T., Cooper H., Czeisler C., Figueri M., Gamlin, P., Lockley, S., O’hagan J., Price, L., Provencio I., Skene D., Brainard G. 2014. “Measuring and Using Light in the Melanopsin Age”, *Trends in Neurosciences*, 37(1), 1-9.
- <sup>18</sup> Cajochen C., Zeitzer J.M., Czeisler C.A., and Dijk D.J. 2000. “Dose-response Relationship for Light Intensity and Ocular and Electroencephalographic correlates of human alertness”, *Behavioural Brain Research*, 115, 75-83.
- <sup>19</sup> Zeitzer J.M., 2000. “Sensitivity of the Human Circadian Pacemaker to Nocturnal Light: Melatonin Phase Resetting and Suppression”, *The Journal of Physiology*. 526, 695-702.
- <sup>20</sup> M Andersen, J Mardaljevic and SW Lockley. A framework for predicting the non-visual effects of daylight - Part I: photobiology- based model. *Lighting Res. Technol.* 2012; 44: 37–53
- <sup>21</sup> Rea MS, Figueiro MG, Bullough JD. 2002. Circadian photobiology: An emerging framework for lighting practice and research. *Light Res Technol* 34(3): 177-190.
- <sup>22</sup> McIntyre IM, Norman TR, Burrows GD, Armstrong SM. 1989. Human melatonin suppression by light is intensity dependent. *J Pineal Res* 6(2):149-156.
- <sup>23</sup> McIntyre IM, Norman TR, Burrows GD, Armstrong SM. 1989. Quantal melatonin suppression by exposure to low intensity light in man. *Life Sci* 45(4): 327-332.
- <sup>24</sup> Anne-Marie Chang, Daniel Aeschbach , Jeanne F. Duffy, and Charles A. Czeisler (2014) Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness Edited by Joseph S. Takahashi, Howard Hughes Medical Institute, University of Texas Southwestern Medical Center, Dallas, TX, and approved November 26, 2014 (received for review September 24, 2014) 1232–1237 | PNAS | January 27, 2015 | vol. 112 | no. 4 [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1418490112](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1418490112)
- <sup>25</sup> Casciani D., Musante F., Rossi M., Siniscalco A. (2014) New Light Vision. Nuovi sistemi di illuminazione a LED per una popolazione che invecchia in LUCE 310 /2014 anno 52 ISSN 1828 – 0560 pag 105 - 109 ([http://issuu.com/rivistaluce/docs/310\\_digitale\\_ok/1?e=11771235/11140605](http://issuu.com/rivistaluce/docs/310_digitale_ok/1?e=11771235/11140605))
- <sup>26</sup> Jakob Markvarta, Åse Marie Hansenb , Jens Christoffersen. Comparison and Correction of the Light Sensor Output from 48 Wearable Light Exposure Devices by Using a Side-by-Side Field Calibration Method. *LEUKOS*, Volume 11, Issue 3, 2015, DOI:10.1080/15502724.2015.1020948
- <sup>27</sup> Jaeseok Yun and Sang-Shin Lee Human Movement Detection and Identification Using Pyroelectric Infrared Sensors, *Sensors* 2014, 14, 8057-8081; doi:10.3390/s140508057
- <sup>28</sup> Luo, X.; Shen, B.; Guo, X.; Luo, G.; Wang, G. Human tracking using ceiling pyroelectric infrared sensors. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Automation*, Christchurch, New Zealand, 9–11 December 2009; pp. 1716–1721.
- <sup>29</sup> Beltran, Alex and Erickson, Varick L. and Cerpa, Alberto E., ThermoSense: Occupancy Thermal Based Sensing for HVAC Control, *Proceedings of the 5th ACM Workshop on Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings*, Rome 2013, isbn 978-1-4503-2431-1
- <sup>30</sup> Chandrayee Basu ,Anthony Rowe, “Tracking Motion and Proxemics using Thermal-sensor Array”, *ArXiv e-prints*
- <sup>31</sup> Luis Ignacio Lopera Gonzalez, Marc Troost, Oliver Amft, “Using a thermopile matrix sensor to recognize energy-related activities in offices”, *Procedia Computer Science* 19 ( 2013 ) 678 – 685 (SEIT 2013)
- <sup>32</sup> David R. Bassett, Holly R. Wyatt, Helen Thompson, John C. Peters, James O. Hill. Pedometer-measured physical activity and health behaviors in U.S. adults. *Med Sci Sports Exerc.* 2010 October ; 42(10): 1819–1825. doi:10.1249/MSS.0b013e3181dc2e54.