



Ricerca di Sistema elettrico

## Lighting Design nell'Industria

M. Rossi, F. Musante, D. Casciani

## LIGHTING DESIGN NELL'INDUSTRIA

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

Luglio 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

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

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

Obiettivo: Sviluppo di prodotti efficienti per l'illuminazione

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Lighting Design nell'industria"

Responsabile scientifico ENEA: Simonetta Fumagalli



Responsabile scientifico per il Politecnico di Milano: prof. Maurizio Rossi

Si ringraziano le aziende che hanno fornito i campioni dei componenti per la costruzione dei prototipi di studio. In particolare: Carclo, Khatod, Ledil, Tridonic.

## Indice

1	INTRODUZIONE .....	6
2	CAPITOLO B1: DEFINIZIONE DEI REQUISITI PER UN SISTEMA DI ILLUMINAZIONE PER AMBIENTI INDUSTRIALI, IN TERMINI DI PERFORMANCE LUMINOSA. ....	7
2.1	ILLUMINAZIONE IN AMBIENTI INDUSTRIALI .....	7
2.2	ILLUMINAZIONE GENERALE: LIVELLO MEDIO DI ILLUMINAMENTO .....	9
2.3	ILLUMINAZIONE GENERALE: UNIFORMITÀ DI ILLUMINAMENTO.....	10
2.4	SORGENTI LUMINOSE .....	10
2.5	SPETTRO DELLE SORGENTI .....	11
2.6	ILLUMINAZIONE LOCALIZZATA .....	11
2.7	ISPEZIONE VISIVA.....	12
2.8	APPARECCHI DI ILLUMINAZIONE.....	14
2.9	APPARECCHI A LED E ABBAGLIAMENTO .....	22
3	CAPITOLO A: SVILUPPO SISTEMA OTTICO PER IL MOTORE LUMINOSO HUMBLEBEE SVILUPPATO DA ENEA.....	29
3.1	HUMBLEBEE .....	29
3.2	PROGETTO OTTICO .....	37
4	CAPITOLO B.2: STUDIO DELLE PROBLEMATICHE DELL'INTERFACCIA DI CONTROLLO DEL SISTEMA AL FINE DI OTTENERE UN SISTEMA EFFICACE ED INTUITIVO, ANCHE PER PERSONALE NON-ESPERTO .....	43
4.1	OVERVIEW: LA LUCE LED ED I SUOI SVILUPPI FUTURI .....	43
4.2	LA LUCE LED COME PIATTAFORMA COGNITIVA, SENSIBILE, INTELLIGENTE .....	43
4.3	USER EXPERIENCE .....	44
4.4	ANALISI DEI CASI STUDIO .....	44
4.4.1	<i>Criteri di selezione dei casi studio e obiettivi.....</i>	44
4.4.2	<i>Il processo di ricerca.....</i>	45
4.5	INTERAGIRE CON L'ILLUMINAZIONE .....	46
4.6	TIPOLOGIE DI INTERFACCIA PER IL CONTROLLO E L'INTERAZIONE CON L'ILLUMINAZIONE.....	47
4.6.1	<i>Graphic User Interface (GUI).....</i>	50
4.6.2	<i>Surface User Interface (SUI).....</i>	50
4.6.3	<i>Tangibile User Interface (TUI).....</i>	51
4.6.4	<i>Interazione Spaziale (gestural UI).....</i>	53
4.7	TIPOLOGIE DI COINVOLGIMENTO E RELAZIONE CON L'ILLUMINAZIONE.....	54
4.7.1	<i>Controllo passivo e controllo attivo .....</i>	54
4.7.2	<i>Controllo automatizzato, manuale e ibrido .....</i>	55
4.7.3	<i>La rappresentazione del controllo: Mapping naturale, astratto e metaforico .....</i>	55
4.8	TIPOLOGIA DI INTERAZIONE: MANIPOLAZIONE E GESTUALITÀ .....	56
4.8.1	<i>Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI .....</i>	56
4.8.2	<i>Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI e SUI .....</i>	58
4.9	SCENARI DI INTERAZIONE CON L'ILLUMINAZIONE DI UN CONTESTO INDUSTRIALE .....	59
4.10	CONTROLLO IBRIDO DEL SISTEMA DI ILLUMINAZIONE INDUSTRIALE .....	59
4.11	ESPERIENZA DI CONTROLLO DEL SISTEMA D'ILLUMINAZIONE COMPLETO.....	62
4.11.1	<i>Modalità automatica.....</i>	62
4.11.2	<i>Modalità manuale .....</i>	64
4.11.3	<i>Sistema di interfaccia SUI .....</i>	66
4.12	ESPERIENZA DI CONTROLLO DEL SISTEMA DI ILLUMINAZIONE LOCALIZZATA.....	70
4.12.1	<i>Interfaccia di controllo utente di tipo TUI (illuminazione localizzata) .....</i>	70
4.12.2	<i>Interfaccia di controllo dell'illuminazione localizzata di tipo SUI .....</i>	71
5	CAPITOLO B.3 PROPOSTA DEL CONCEPT DI UN SISTEMA DI ILLUMINAZIONE CHE INTEGRI LE FUNZIONI DI ILLUMINAZIONE GENERALE E QUELLA DI ILLUMINAZIONE LOCALIZZATA PER UNA POSTAZIONE DI LAVORO TIPO, TENUTO CONTO DEI RISULTATI OTTENUTI DURANTE LA FASE INIZIALE DI DEFINIZIONE DEI REQUISITI .....	73

5.1	IL LAVORO DI TIPO INDUSTRIALE: L'UOMO, L'AMBIENTE LA LUCE .....	73
5.2	LE ATTIVITÀ DI LAVORO: RELAZIONE UOMO-MACCHINA .....	73
5.3	L'IMPORTANZA DELL'AMBIENTE DI LAVORO: AFFORDANCES.....	75
5.4	PROGETTO DELL'ILLUMINAZIONE DEGLI SPAZI INDUSTRIALI .....	75
5.4.1	<i>Overview generale</i> .....	75
5.5	TIPOLOGIE DI ILLUMINAZIONE .....	76
5.6	ILLUMINAZIONE LOCALIZZATA .....	78
5.6.1	<i>Obiettivi generali di progetto</i> .....	78
5.7	REQUISITI DEL SISTEMA DI ILLUMINAZIONE LOCALIZZATO .....	79
5.8	PERFORMANCE VISIVA E TEMPERATURA DI COLORE.....	80
5.9	RICERCA SULLO STATO DELL'ARTE SULL'ILLUMINAZIONE LOCALIZZATA PER IL LAVORO.....	83
5.9.1	<i>Prodotti in commercio: illuminazione portatile e fissa</i> .....	83
5.10	IL MOTORE LUMINOSO L@W .....	85
5.10.1	<i>Performance di illuminazione: quantità e qualità</i> .....	85
5.10.2	<i>Performance di illuminazione: controllo automatico e controllo manuale</i> .....	85
5.10.3	<i>Performance di illuminazione: motore luminoso e sistema</i> .....	86
5.11	RICERCA SULLO STATO DELL'ARTE TECNOLOGICO.....	88
5.11.1	<i>Sistemi ottici</i> .....	88
5.11.2	<i>Lenti a fuoco variabile per illuminazione allo stato solido</i> .....	90
5.11.3	<i>Array di LED vs modulo /COB</i> .....	95
5.11.4	<i>Diffusori olografici</i> .....	102
5.12	IL PROGETTO L@W: LIGHT AT WORK .....	105
5.12.1	<i>Schizzi preliminari di progetto</i> .....	105
	Proposta 01.....	106
	Proposta 02.....	107
	Proposta 03.....	107
5.12.2	<i>Proposta 03: Prototipo formale e funzionale</i> .....	108
5.12.3	<i>Design del prototipo definitivo: forma e funzione (termica e fotometrica)</i> .....	115
5.12.4	<i>Proposta 01: soluzioni elaborate e selezionate</i> .....	115
5.12.5	<i>Proposta 02: soluzioni elaborate e selezionate</i> .....	119
6	CAPITOLO B.4 REALIZZAZIONE DI UN PROTOTIPO ESCLUSIVAMENTE FUNZIONALE DAL PUNTO DI VISTA OTTICO-FOTOMETRICO ED ELETTRICO E MISURE E NELL'ESAME DEI RISULTATI DI MISURA FOTOMETRICA E COLORIMETRICA SU TALE PROTOTIPO. ....	122
6.1	INTRODUZIONE .....	122
6.2	MISURE FOTOMETRICHE SU PROTOTIPI DI STUDIO .....	123
6.2.1	<i>Soluzione 01: LED array + Lente Carclo + Lente Optotune</i> .....	123
6.2.2	<i>Soluzione 02: LED COB + Lente di Fresnel Khatod</i> .....	132
6.2.3	<i>Soluzione 03: LED Array + Riflettore Venla + Diffusore Olografico (10°) + Lente Optotune</i> .....	138
6.2.4	<i>Soluzione 4: Modulo LED ibrido Tridonic Talex + Riflettore Angela + Diffusore olografico 80°</i> .....	144
6.3	MISURE COLORIMETRICHE.....	150
7	ALLEGATO A: SCHEDE CASI STUDIO .....	160
7.1	INTERACTING WITH LIGHTING INNOVATIONS.....	160
7.2	AMBIENT DATA.....	162
7.3	MOODLIGHT .....	164
7.4	FONCKEL .....	166
7.5	X&Y .....	167
7.6	APPARECCHI DI ILLUMINAZIONE INTERATTIVI: SEIDE LIGHT, AIR LIGHT E WATER LIGHT.....	168
7.7	FORGETMENOT .....	170
7.8	AREA E RIMA.....	171
7.9	SENSE AND SIMPLICITY .....	172
7.10	TIMID INTERACTIVE LAMP.....	174
7.11	LEAP MOTION CONTROLLER.....	175
7.12	LUCEPLAN OTTOWATT, ASCENT TABLE .....	176
7.13	ROOM-E FROG .....	178

7.14	ARTEMIDE SCRITTURA .....	179
7.15	TOSHIBA .....	181
7.16	AMBIANTI .....	182
7.17	SPECIES OF ILLUMINATION SERIES .....	183
7.18	WALICE .....	184
7.19	CLYDE .....	186
7.20	GOODNIGHTLAMP .....	187
7.21	TELECOMANDO DI LIVINGCOLORS PHILIPS .....	188
7.22	THRONE .....	189
7.23	VIA .....	191
7.24	EYEON .....	192
7.25	ONE .....	193
7.26	LIRIO, LUCEBAR SERIES .....	194
7.27	PUPA LAMP .....	195
7.28	PHILIPS RESEARCH FOR AN OFFICE LIGHTING .....	196
7.29	GOLDEE LIGHT CONTROLLER .....	198
7.30	NOD RING .....	199
7.31	M-BEAM .....	200
7.32	HUEMOTION CONTROLLER .....	201
7.33	PETTING ROBOTS ZOO .....	203
7.34	EYENUT .....	205
8	CONCLUSIONI .....	206
9	CURRICULUM LABORATORIO LUCE – POLITECNICO DI MILANO .....	206
10	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	207

## 1 Introduzione

Lo scopo della ricerca è quello di valutare l'impatto e possibili scenari applicativi delle nuove tecnologie LED nell'illuminazione industriale: in questo ambito di impiego, aspetti importanti investono la produttività dei lavoratori, il comfort visivo in termini di corretti livelli di illuminamento, contenimento dell'abbagliamento e dei segni di affaticamento dei lavoratori. Una migliore illuminazione può contribuire a ridurre il rischio di incidenti, migliorare l'efficienza dei controlli visivi sulle lavorazioni e aumentare l'efficienza di produzione.

In questo contesto di applicazione specifico, la tecnologia LED presenta notevoli vantaggi rispetto alle sorgenti di tipo tradizionale: consente di ridurre gli interventi di manutenzione (che determinano interruzioni durante l'attività lavorativa), consente una maggiore flessibilità di utilizzo (dimming per la regolazione dei livelli di illuminamento, diversa temperatura di colore in funzione del compito visivo, accensione istantanea degli apparecchi, interfaccia con sensori di luminosità e di presenza) e offre nuove possibilità di controllo e gestione digitale molto sofisticate dell'impianto attraverso interfacce intuitive e di facile utilizzo.

Il fine ultimo del progetto di ricerca è quello di giungere alla definizione di un sistema di illuminazione per applicazioni in ambito industriale che risponda a criteri di risparmio energetico, ridotta manutenzione, miglioramento del comfort visivo dei lavoratori.

Il lavoro sarà strutturato nelle seguenti fasi:

- Definizione dei requisiti per un sistema di illuminazione per ambienti industriali, in termini di performance luminosa (livelli di illuminamento, uniformità, contenimento dell'abbagliamento) e in termini di temperatura di colore, resa cromatica. L'attività è stata svolta attraverso delle valutazioni e comparazioni tra diverse soluzioni tecnologiche disponibili sul mercato.
- Completamento del "motore luminoso" (HUMBLEBEE) precedentemente sviluppato da ENEA per il proprio Laboratorio, con particolare attenzione alla progettazione del sistema ottico al fine di ottimizzarne la distribuzione luminosa e l'efficienza, ma garantendo allo stesso tempo il contenimento dell'abbagliamento e un soddisfacente livello di comfort visivo.
- Studio delle problematiche dell'interfaccia di controllo del sistema (accensione spegnimento di tutti o i singoli centri, regolazione dell'intensità del singolo centro) al fine di ottenere un sistema efficace ed intuitivo, anche per personale non-esperto
- Proposta del concept di un sistema di illuminazione che integri le funzioni di illuminazione generale (vedi punto precedente) e quella di illuminazione localizzata per una postazione di lavoro tipo

## 2 Capitolo B1: Definizione dei requisiti per un sistema di illuminazione per ambienti industriali, in termini di performance luminosa.

### 2.1 *Illuminazione in ambienti industriali*

L'illuminazione industriale è un settore di ricerca non molto dinamico, non tanto per mancanza di importanza rispetto ad altri ambienti di lavoro (uffici), ma per la difficoltà a generalizzare ogni conclusione: la natura delle attività svolte in un ufficio sono molto simili rispetto alla generalità di questi ambienti e le conclusioni di studi condotti in un particolare contesto sono facilmente estendibili anche in altri.

Al contrario lo studio e la definizione di requisiti per l'illuminazione ottimale di una particolare attività produttiva, sono difficilmente generalizzabili ad altre e questo rende difficile la ricerca in questo settore dell'illuminazione, limitandosi all'indicazione di soluzione per problemi specifici di grande rilevanza.

Il principale problema che si deve affrontare nell'ambito dell'illuminazione industriale è la grande varietà e natura dei requisiti visivi: alcune attività industriali richiedono la valutazione e l'estrazione di dettagli di forma e finitura superficiale, altri lavori richiedono la capacità di un accurato coordinamento tra occhio e movimento della mano, oppure un giudizio o discriminazione cromatica su particolari verniciati.

Altre attività industriali possono essere svolte invece ricorrendo a informazioni visuali molto ridotte: in questo caso ciò che conta è solo il livello medio di illuminamento sul compito visivo; in altri casi la superficie su cui deve essere fatto il riconoscimento delle caratteristiche può presentare finiture molto differenti tra loro: diffusa, speculare, intermedia e l'informazione visiva può essere estratta da osservazioni su piani differenti, implicando numerose diverse direzioni di osservazione. Anche gli oggetti osservati possono essere fermi o mobili lungo una linea di montaggio.

Nessuno dei requisiti elencati presenta un problema insuperabile per un progettista che ha una chiara idea di quali sono i compiti visivi, delle finiture superficiali dei materiali illuminati, e le modalità delle attività lavorative che si svolgono all'interno dello spazio e la disposizione delle attrezzature produttive: in alcuni casi la presenza di canalizzazioni sul soffitto limita fortemente l'emissione degli apparecchi luminosi, allo stesso modo la presenza di macchinari molto ingombranti può produrre ombre molto marcate in alcune zone dello spazio di lavoro (l'emissione degli apparecchi viene parzialmente schermata).

Occorre poi osservare che il posizionamento del piano di lavoro potrebbe non essere sempre orizzontale o che possano esistere più piani di lavoro che devono essere considerati contemporaneamente durante il progetto: un magazzino nella zona di ricezione e imballaggio dei materiali, i piani di lavoro orizzontale e verticali sono egualmente importanti, ma nelle corsie di immagazzinamento dei prodotti, il compito visivo sarà principalmente verticale, con scarsa necessità di estrarre informazioni dal piano orizzontale.

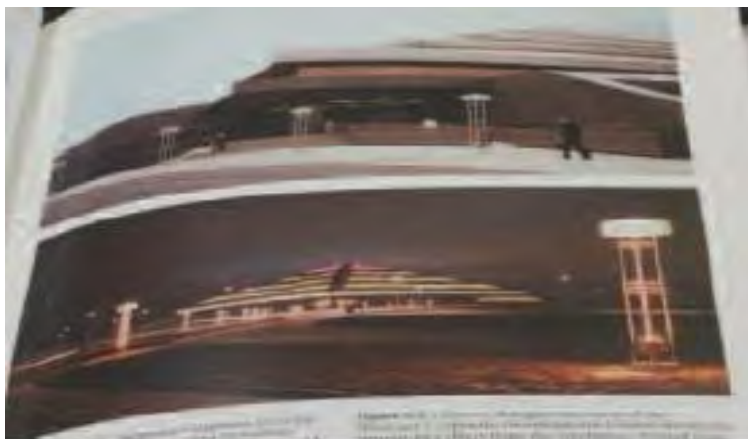
La grande varietà delle direzioni di osservazione comporta la necessità di un controllo molto accurato dell'abbagliamento, mediante la corretta pianificazione delle posizioni degli osservatori e delle direzioni di vista.



**Figura 1** Esempio di magazzino industriale, dove i compiti visivi possono giacere su piani orizzontali e verticali a seconda dell'attività svolta

Anche la direzionalità della luce è un fattore molto importante per due ragioni principali:

- Le ostruzioni degli arredi e attrezzature di produzione producono ombre e il fenomeno è tanto più marcato quanto più la luce proviene da un punto e da una sola direzione; per ridurre il fenomeno sarebbe opportuno che l'illuminazione in un punto provenisse da più direzioni e questo risultato si ottiene utilizzando un maggior numero di apparecchi di potenza specifica (e quindi flusso luminoso) più basso piuttosto che un numero ridotto di apparecchi di elevata potenza, prediligendo apparecchi con distribuzioni fotometriche ampie<sup>1</sup> e sfruttando al meglio le inter-riflessioni all'interno dell'ambiente.
- La seconda ragione riguarda la presenza di riflessioni velanti che rappresentano l'immagine di oggetti ad elevata luminanza, come ad esempio finestre o apparecchi di illuminazione, sul compito visivo. Questo fenomeno diminuisce il contrasto sul compito visivo e quindi la capacità del lavoratore di svolgere il proprio lavoro in modo soddisfacente. Il fenomeno è particolarmente evidente con distribuzioni fotometriche molto chiuse e con alcuni particolari tipi di materiali che presentano un comportamento speculare<sup>2</sup>: la presenza di highlights sul compito visivo, non è sempre da ritenersi dannosa, ma dipende dal tipo di lavoro che deve essere svolto<sup>3</sup>.



**Figura 2** La pagina di un libro con pagina a finitura lucida: in alto senza luminanza velante, in basso con luminanza velante

<sup>11</sup> La scelta della distribuzione fotometrica deve anche tenere conto del contenimento dell'abbagliamento

<sup>2</sup> La presenza di una significativa componente diffusa, contribuisce a ridurre il fenomeno

<sup>3</sup> Si pensi ad esempio all'impiego di apparecchi orientabili per illuminazione localizzata



Lo scopo dell'illuminazione in ambienti industriali è quello di assicurare il soddisfacimento dei seguenti requisiti:

- La massima sicurezza, al fine di ridurre gli incidenti e la loro gravità
- Garantire una buona visibilità del compito visivo, al fine di agevolare e semplificare l'attività lavorativa: questo aspetto è particolarmente importante nei casi in cui vi sia un impegno prolungato e che richiede elevata attenzione dell'utente
- Un adeguato confort dell'ambiente lavorativo a cui anche l'illuminazione concorre a determinare
- Risparmio energetico, sia dal punto di vista dei consumi, sia da quello del risparmio delle attività di manutenzione

## 2.2 Illuminazione generale: livello medio di illuminamento

I requisiti illuminotecnici si riferiscono di norma al livello di illuminamento orizzontale medio in esercizio misurato sul piano di lavoro (considerato di norma ad un'altezza di 0.75-0.8 m dal pavimento), mentre per i luoghi di transito l'altezza a cui sono riferiti gli illuminamenti risulta pari a 30 cm dal pavimento.

Il livello medio di illuminamento in esercizio rappresenta la media aritmetica degli illuminamenti orizzontali (calcolati o misurati sul campo) in corrispondenza dei nodi di un reticolo sul piano di riferimento, tenuto conto della riduzione di flusso delle sorgenti luminose all'aumentare delle ore di funzionamento e dell'insudiciamento delle parti ottiche trasparenti dell'apparecchio di illuminazione.

Il livello di illuminamento medio dipende da molti fattori:

- Dalle dimensioni dei dettagli che devono essere percepiti (esempio piccoli dettagli di un dispositivo meccanico)
- Dal contrasto cromatico o di luminanza tra l'oggetto (target) e la zona immediatamente circostante all'interno del campo visivo
- Dalla rapidità o dalla precisione richieste nell'esecuzione del lavoro
- Dalla durata per la quale il lavoro deve essere eseguito senza interruzioni

Il riferimento normativo per la scelta dei valori di illuminamento in dipendenza dell'attività lavorativa sono la norma UNI EN 12464-1 e UNI EN 12464-2 e la norma internazionale ISO 8995:2002/CIE S 008/E:2001, in cui sono messe in relazione le attività lavorative con i valori medi di illuminamento orizzontale in esercizio.

L'illuminazione generale degli ambienti industriali viene generalmente ottenuta attraverso una disposizione ordinata degli apparecchi in una o più file per la realizzazione di una matrice.

L'influenza dell'altezza di installazione sulla scelta della sorgente luminosa (e quindi anche il tipo di apparecchio), è schematizzata alla Figura 3: al decrescere dell'altezza di installazione una maggiore cura dovrà essere posta nel controllo dell'abbagliamento. Dove la direzione di osservazione è verso l'alto nella direzione dell'apparecchio di illuminazione, si dovranno adottare apparecchi a minore luminanza e con maggiore area luminosa.

Mounting height (m)	Usual light source
2.5 to 3.0	Fluorescent
3.0 to 6.0	Fluorescent or low wattage, high pressure discharge
Above 6.0	High wattage high pressure discharge

**Figura 3 Legame tra altezza di installazione degli apparecchi e sorgente luminoso usualmente utilizzata**

L'impiego di apparecchi con lampada fluorescente lineare disposti parallelamente alla direzione di osservazione, con i banchi di lavoro o i macchinari di produzione ortogonali alla fila degli apparecchi, rappresenta una soluzione impiantistica generalmente utilizzata.

### 2.3 Illuminazione generale: Uniformità di illuminamento

Al fine di evitare l'affaticamento dei lavoratori, dovuto al continuo adattarsi del sistema visivo a livelli differenti di illuminamento, i requisiti illuminotecnici per ambienti industriali, prevedono il rispetto del valore di uniformità di illuminamento, cioè del rapporto tra il valore minimo dell'illuminamento nei nodi del reticolo sul compito visivo e il valore medio nei medesimi punti, non risulti inferiore a 0.8.

Il raggiungimento di tale requisito può essere ottenuto dal progettista agendo su diverse variabili:

- Rapporto tra l'altezza utile (distanza tra il piano contenente gli apparecchi di illuminazione e il piano di lavoro) e interdistanza tra gli apparecchi
- Distribuzione fotometrica degli apparecchi (nel caso di distribuzione roto-simmetrica, le differenti distribuzioni potrebbero essere scelte in relazione al differente valore dell'apertura del fascio luminoso)
- Dal fattore di riflessione delle superfici dell'ambiente, degli arredi e delle attrezzature poste all'interno dell'ambiente di lavoro.

### 2.4 Sorgenti luminose

Gli aspetti da considerare che riguardano la scelta delle sorgenti luminose possono essere riassunte nei seguenti punti:

- Temperatura di colore
- Resa cromatica
- Efficienza luminosa
- Flusso luminoso
- Durata e decadimento del flusso luminoso nel tempo (parametro che riveste una certa importanza nella pianificazione degli interventi di manutenzione programmata e quindi nella determinazione del costo di esercizio dell'impianto)

Per quanto riguarda le sorgenti tradizionali, in aggiunta ai precedenti requisiti, occorrerà anche considerare:

- Tempo di messa a regime (intervallo di tempo che devo attendere dall'innesco della lampada prima che questa emetta il suo flusso nominale).
- Tempo di riaccensione a caldo (l'intervallo di tempo che occorre attendere prima che la lampada si inneschi nuovamente a seguito dell'interruzione dell'energia elettrica, dopo il ripristino dell'alimentazione elettrica). Per le lampade a vapori di sodio alta pressione questo tempo è contenuto in 60 secondi, mentre per le lampade ad alogenuri metallici generalmente sono necessari tempi da 240 a 900 secondi.
- Posizione di funzionamento

Di norma i requisiti precedenti sono trascurabili per sorgenti a LED, dove la riaccensione a caldo è immediata, non esistono problemi di legati alla posizione di funzionamento<sup>4</sup>, l'emissione della sorgente è massima all'accensione e si riduce al crescere della temperatura di giunzione fino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio termico.

Le sorgenti tradizionali maggiormente utilizzate per la realizzazione dell'illuminazione generale di un ambiente industriale sono:

- Lampade fluorescenti lineari
- Vapori di sodio ad alta pressione

---

<sup>4</sup> Negli apparecchi correttamente dimensionati dal punto di vista termico, la variazione di flusso luminoso con la posizione di funzionamento, che si origina dalla diversa temperatura di giunzione dei LED a causa del diverso valore della convezione, risulta contenuta in un 10% circa.

- Lampade ad alogenuri metallici

La comparsa sul mercato apparecchi di illuminazione a LED, in cui le sorgenti luminose risultano spesso integrate e non sostituibili all'interno del prodotto, ha portato a considerare in maniera differente i precedenti requisiti, spostandoli dalla sorgente all'intero apparecchio.

Si parlerà quindi di efficienza luminosa dell'apparecchio, intesa come rapporto tra il flusso luminoso emesso e la potenza elettrica assorbita, comprensiva delle inefficienze del sistema di alimentazione, di temperatura correlata di colore, flusso luminoso emesso, resa cromatica, potenza elettrica riferiti all'intero apparecchio.

## 2.5 Spettro delle sorgenti

Lo spettro delle sorgenti e la capacità di "rendere" i colori è un altro fattore che deve essere tenuto in considerazione dal progettista: nei luoghi e nei compiti visivi in cui il colore degli oggetti non ha una particolare importanza, molte sorgenti luminose possono essere utilizzate per realizzazione degli impianti di illuminazione.

Nei casi in cui il colore degli oggetti o dei particolari lavorati abbia un preciso significato, come ad esempio nei cablaggi elettrici, quando l'operatore deve verificare il matching tra un riferimento e la produzione di particolari verniciati, allora lo spettro della sorgente gioca un ruolo fondamentale nella scelta di progetto.

In generale, dove risulta necessario solo il riconoscimento di colori molto ben differenziati tra loro, un indice di resa cromatica pari a 65 o superiore potrebbe essere sufficiente; quando un giudizio più accurato è richiesto (esempio riconoscimento del colore dei cavi in un cablaggio elettrico), allora l'impiego di una sorgente con indice di resa cromatica 80 o superiore risulta necessario.

Quando il giudizio sul colore ha un maggior impatto sulla qualità o il valore del prodotto, occorre ricorrere a distribuzioni spettrali specifiche e a stanze appositamente attrezzate e/o a cabine colore : per esempio per il controllo di qualità dei prodotti tessili (cotone), occorre realizzare illuminamenti nell'ordine di 600-800 lux con una sorgente luminosa capace di emulare quanto più possibile la luce solare (D65).

Elevati valori dell'indice di resa cromatica comportano inevitabilmente una riduzione dell'efficienza luminosa della sorgente ed è quindi compito del progettista dell'impianto selezionare la migliore sorgente in relazione all'applicazione e prevedere adeguati accorgimenti (cabina colore) per il raggiungimento del risultato.

La scelta più appropriata dello spettro delle sorgenti luminose coinvolge anche aspetti di sicurezza: nel 1977 un ricercatore Jerome<sup>1</sup> ha esaminato la capacità degli utenti di indicare correttamente i colori utilizzati per le segnalazioni di sicurezza quando illuminati con un valore di illuminamento di 5 lux, utilizzando sorgenti luminose con differenti valori dell'indice di resa cromatica.

Il risultato dell'esperimento fu che le sorgenti con indice inferiore come le lampade a vapori di mercurio ad alta pressione e le lampade al sodio ad alta pressione determinavano una maggiore difficoltà degli utenti al riconoscimento dei colori di sicurezza per bassi valori di illuminamento.

L'esperimento non chiarisce completamente quale sia l'influenza del basso livello di illuminamento e quanto pesi invece la ridotta capacità della sorgente a rendere i colori.

## 2.6 Illuminazione localizzata

L'illuminazione localizzata assume diverse forme e serve a raggiungere molti scopi differenti: la forma più semplice è un apparecchio di illuminazione orientabile che fornisce un'illuminazione addizionale in una zona localizzata dell'area di lavoro e consente all'utente di avere una certa forma di controllo sull'illuminazione della zona di lavoro.

Sono una soluzione molto comune in tutte quelle zone dove l'area di lavoro è in ombra, nonostante la presenza di una illuminazione generale dell'ambiente: la loro principale caratteristica è quella di consentire all'operatore di modificare la distribuzione luminosa sul compito visivo (orientamento del fascio oppure avvicinamento della sorgente luminosa al particolare da osservare/lavorare al fine di aumentarne il livello di illuminamento).



Figura 4 Esempio di apparecchio per illuminazione localizzata con sorgenti LED<sup>5</sup>

In alcuni casi l'illuminazione supplementare è mobile: gli apparecchi sono montati su carrelli con ruote che possono essere posizionati in punti precisi dello stabilimento in modo da garantire un livello di illuminamento superiore, qualora necessario per una particolare lavorazione.



Figura 5 Esempi di luce localizzata per il controllo qualità: in alto

## 2.7 Ispezione visiva

Un particolare tipo di illuminazione localizzata è quella richiesta per l'ispezione visiva di componenti o parti di produzione.

Questa attività si può scomporre in due differenti passi successivi:

- Ricerca e identificazione del difetto
- Valutazione del difetto e decisione su che cosa fare a seguito del difetto riscontrato (es. scarto il componente, procedo alla sua riparazione, ecc.)

<sup>5</sup> Immagine tratta da : [http://www.grainger.com/product/LIND-EQUIPMENT-LED-Dock-Light-41D986?s\\_pp=false](http://www.grainger.com/product/LIND-EQUIPMENT-LED-Dock-Light-41D986?s_pp=false)

Le condizioni di illuminazione possono migliorare le performance di lavoratori solo per la prima attività. Alcuni studi sono stati compiuti sulle modalità con cui avviene l'operazione di ricerca dei difetti nei prodotti e si è scoperto che questo avviene con un meccanismo comune costituito da una fissazione e da movimenti saccadici dell'occhio. L'osservatore ricerca il difetto attraverso una serie di pause di fissazione cambiando il punto osservato con rapidi movimenti saccadici dell'occhio. Lo schema di esplorazione dell'oggetto avviene in modo sistematico e non casuale, secondo l'esperienza dell'operatore: il difetto o un particolare che potrebbe essere un difetto viene dapprima percepito nel campo di vista periferico (off-axis detection) e successivamente confermato portando il punto di interesse nella visione foveale attraverso rapidi movimenti saccadici.<sup>6</sup> Le caratteristiche del sistema di illuminazione hanno lo scopo di aumentare la probabilità della percezione nel campo di vista periferico di un difetto. Ci sono molti metodi di illuminare il compito visivo per la ricerca dei difetti: tutto dipende dalla capacità del sistema di illuminazione di rendere il difetto maggiormente visibile e cospicuo. La Figura 6 mostra alcune soluzioni che si possono adottare:

- a) Per prevenire riflessioni velanti, la luce non deve provenire dalla direzione speculare a quella di vista
- b) L'osservazione di dettagli speculari su uno sfondo diffondente, è agevolata se la luce riflessa non coincide con l'angolo di osservazione
- c) L'incidenza radente della luce facilita la rilevazione delle irregolarità della superficie
- d) La luce riflessa da una sorgente estesa, facilita l'identificazione di imperfezioni nella finitura di superfici lucide
- e) Luce diffusa da sorgente estesa facilita la composizione
- f) Irregolarità in materiali trasparenti possono essere evidenziate utilizzando la luce trasmessa da una sorgente diffondente
- g) Illuminazione per silhouette (in negativo l'oggetto appare scuro su fondo chiaro) è un mezzo efficace per verificare il contorno
- h) Luce direzionale è necessaria per rivelare forme e tessitura

---

<sup>6</sup> Peter Boyce, Human factor in lighting, 2nd edition , Lighting Research Center, pages 277-300



Figura 6 Esempi di illuminazione per ispezione visuale

## 2.8 Apparecchi di illuminazione

L'apparecchio di illuminazione per ambienti industriali, adatto ad ospitare sorgenti tradizionali, è di norma costituito da un corpo, con funzioni prevalentemente di sostegno meccanico, protezione dei componenti (elettrica e meccanica), da un riflettore, da uno schermo e dagli ausiliari elettrici necessari al funzionamento della sorgente.

Il controllo del flusso luminoso emesso dalle lampade risulta particolarmente importante al fine di raggiungere i seguenti risultati:

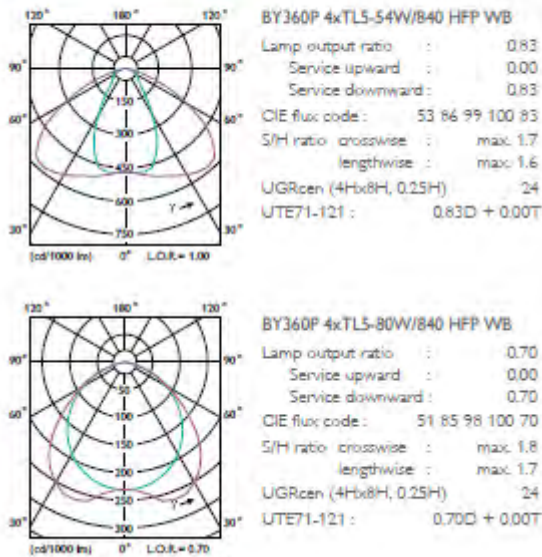
- Prevenzione dell'abbagliamento
- Distribuzione del flusso luminoso sul compito visivo in maniera ottimale
- Efficienza luminosa elevata
- Grado di protezione IP adatto all'applicazione
- Assicurare il buon funzionamento e la buona durata della lampada: questo aspetto è ancora più importante per gli apparecchi allo SSL in cui il valore del flusso emesso (e di conseguenza l'efficienza, intesa come rapporto tra il flusso emesso e la potenza elettrica assorbita dalla rete) e la durata dei LED dipendono in modo diretto dalla temperatura di giunzione alla quale si trovano ad operare
- Sostituzione agevole di lampade (negli apparecchi tradizionali) e dei sistemi di alimentazione (tradizionali e LED)
- Assicurare il soddisfacimento delle esigenze di durata, costo iniziale, estetica

Il tipo di apparecchio di illuminazione da impiegare dipende essenzialmente dai valori di illuminamento medio da ottenere sul compito visivo e dall'altezza dei locali da illuminare e si distinguono pertanto tre casi differenti:

- Locali con altezza inferiore ai 7-8 metri: in questo caso la soluzione tipica è l'impiego di lampade fluorescenti lineari, spesso montate su canaline che consentono la connessione elettrica e

meccanica. I vantaggi di questa soluzione sono la possibilità di creare file continue di apparecchi con ottiche intercambiabili e personalizzate in funzione del compito visivo. La struttura di questo genere di apparecchi con è troppo di versa da analoghi prodotti utilizzati in interni che montano il medesimo tipo di lampada (es. apparecchi per uffici, illuminazione di corsie di supermercati, ecc.).

### Polar intensity diagrams



**Figura 7 Distribuzione fotometrica fascio medio e largo per apparecchio per illuminazione industriale con lampade fluorescenti T5 (Philips T5 HighBay)**

I riflettori sono cilindrici, in alluminio anodizzato di elevata purezza o bianchi in accoppiamento a schermi di chiusura prismatici per limitare i fenomeni di abbagliamento. Le differenze rispetto ad altri ambiti applicativi risiedono essenzialmente nel diverso grado di protezione, nel design più essenziale e meno attento al dettaglio, alla presenza, quasi obbligatoria di schermi di chiusura al fine di preservare dal degrado le superfici ottiche dell'apparecchio.



**Figura 8 Apparecchio di illuminazione per ambienti industriali con lampade fluorescenti T5 (Philips T5 HighBay)**

- Locali con altezza compresa tra 8-20 metri : la soluzione tipica è quella di utilizzare lampade al sodio ad alta pressione (se la resa cromatica non è un parametro essenziale nello svolgimento del compito visivo) oppure ad alogenuri metallici dotate di riflettore con distribuzione roto-simmetrica o con differenti aperture nei due semipiani. Le aperture da impiegare dipendono essenzialmente dell'altezza dell'installazione dei centri luminosi e dal tipo di matrice in cui sono organizzati gli

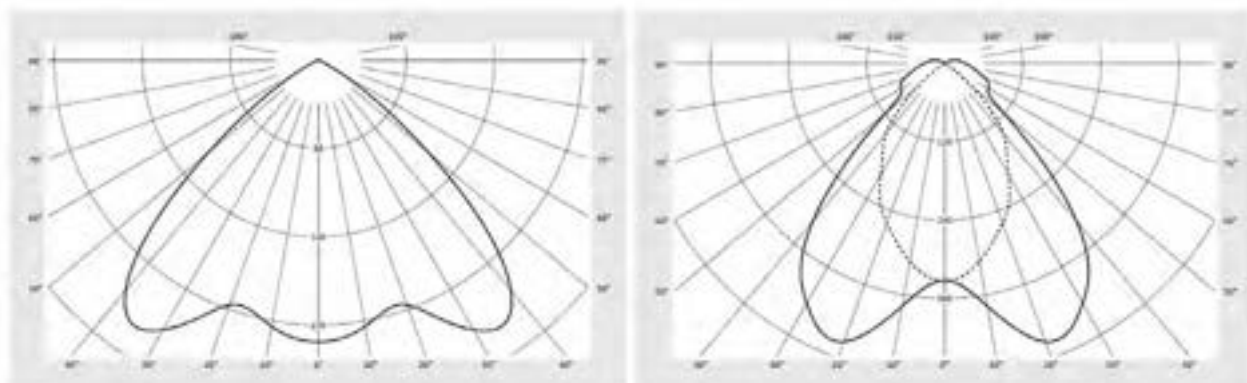
apparecchi. Infatti, determinato il numero di apparecchi con il metodo del flusso totale, occorre ricoprire al meglio l'area da illuminare sovrapponendo il maniera opportuna le distribuzioni luminose sul piano di lavoro e cioè distanziando gli apparecchi all'interno della matrice.

Distribuzioni differenti nei due piani principali (C0-180° vs C90-270), possono essere utili quando gli apparecchi sono disposti a matrice e si desidera ridurre l'illuminamento delle pareti che altrimenti apparirebbero sovra-illuminate, oppure in un magazzino con alti scaffali a definire dei corridoi, per garantire al contempo livelli di illuminamento adeguati sul piano orizzontale e verticale dove sono stoccate le merci.



**Figura 9 Apparecchio OSRAM SITECO LP 37325\_1 esploso nei suoi componenti costitutivi.**

Gli apparecchi tradizionali di questo genere sono di norma costituiti da un riflettore che ospita la lampada in posizione verticale: il porta-lampada e gli ausiliari elettrici sono di solito contenuti in un apposito vano che svolge diverse funzioni contemporaneamente: fissaggio piastra isolante per ausiliari elettrici e portalamпада, gancio per fune o catena di sospensione, innesto per riflettore.



**Figura 10 Esempio di distribuzione fotometrica apparecchi OSRAM SITECO per illuminazione industriale : a sinistra distribuzione fotometrica rotosimmetrica a fascio ampio (LP 37325\_1), a destra distribuzione a fotometrica differenziata sui due piani C=0-180° e C=90-270° per illuminazione di corridoi (42374\_2)**



Questo tipo di soluzione risulta molto versatile<sup>7</sup> dal momento che la sostituzione del solo riflettore può dare luogo a molte differenti distribuzioni fotometriche a seconda della particolare applicazione di interesse; il principale svantaggio consiste nell'assenza di modularità nel flusso luminoso emesso che varia in termini discreti passando attraverso le differenti potenze di lampada. A questo si deve aggiungere la poca flessibilità nel dimming delle lampade a scarica (alogenuri o sodio), soprattutto se utilizzate in congiunzione con alimentatori ferro-magnetici.

- Locali con altezza superiore a 20 metri : si utilizzano proiettori con lampade a scarica di elevata potenza a ioduri metallici o al sodio ad alta pressione.

Per quanto riguarda gli apparecchi di illuminazione a LED, in linea generale, possiamo identificare tre differenti schemi costruttivi:

- Apparecchi di illuminazione che utilizzano power LED e lenti free-form organizzati in una struttura modulare : in questo modo è possibile realizzare apparecchi di illuminazione con il flusso desiderato e con la distribuzione fotometrica personalizzata (tutte del medesimo tipo o combinazione di lenti con differente emissione). Questa soluzione consente di ottenere un buon rapporto costo prestazione, dato il costo contenuto di lenti (in policarbonato o metacrilato) e power LED oggi disponibili sul mercato. La regolazione " fine" del flusso emesso può essere effettuata mediante dimming, dato che tutti i costruttori offrono LED driver dimmerabili mediante interfaccia 1-10 V o DALI.

Per quanto riguarda i sistemi di fissaggio, di norma i costruttori offrono la possibilità di fissaggio a canalina elettrificata o a sospensione (plafone). I principali limiti di questa soluzione riguardano il peso del sistema dovuto principalmente al sistema dissipazione (che deve essere pertanto studiato con attenzione dal progettista che dovrà fissare una temperatura di giunzione di lavoro compromesso tra la durata dei LED e il contenimento delle dimensioni del sistema di smaltimento del calore) e alla complessità costruttiva derivante dal fatto che vengono utilizzati una moltitudine di sorgenti con flusso specifico piuttosto contenuto (Power LED)



**Figura 11 Esempio di apparecchio modulare a LED per illuminazione industriale LANZINI: l'unità atomica del sistema è il modulo (stagno) che contiene 20 LED equipaggiabili con differenti tipi di ottiche. Il numero di moduli dipende dal flusso luminoso richiesto dall'applicazione**

<sup>7</sup> Il sistema risulta versatile anche se non particolarmente economico dal momento che tutti i diverse ottiche devono essere accuratamente progettate e realizzate mediante attrezzature di produzione mediamente costose. Come si vedrà in seguito, l'impiego di LED e di lenti free form liberamente disponibili sul mercato, riduce i costi di investimento in attrezzature garantendo al contempo la medesima versatilità.

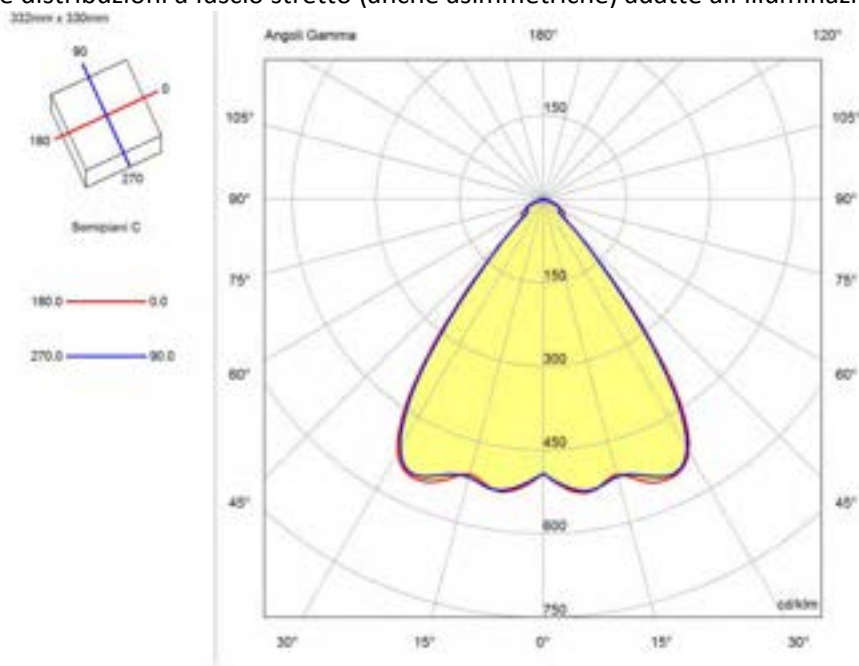


**Figura 12 Apparecchio GRAFT di Zumtobel**

La durata dell'apparecchio è garantita da vari accorgimenti, quali ad esempio il grado di protezione IP 65 assicurato dalla guarnizioni che circondano l'intero perimetro del vano ottico al fine di impedire l'ingresso di umidità e polvere.

La dissipazione del calore è un altro elemento che contribuisce alla durata e al mantenimento del flusso luminoso emesso nel tempo: il sistema di dissipazione dell'apparecchio GRAFT è di tipo passivo e la sua geometria impedisce l'accumulo della polvere che riduce la convezione termica sulle alette del dissipatore. A tale proposito, occorre considerare che l'elevata altezza di installazione e il campo applicativo (capannoni industriali con scarso isolamento termico verso l'esterno) fanno sì che le temperature di esercizio possano raggiungere valori elevati durante la stagione estiva.

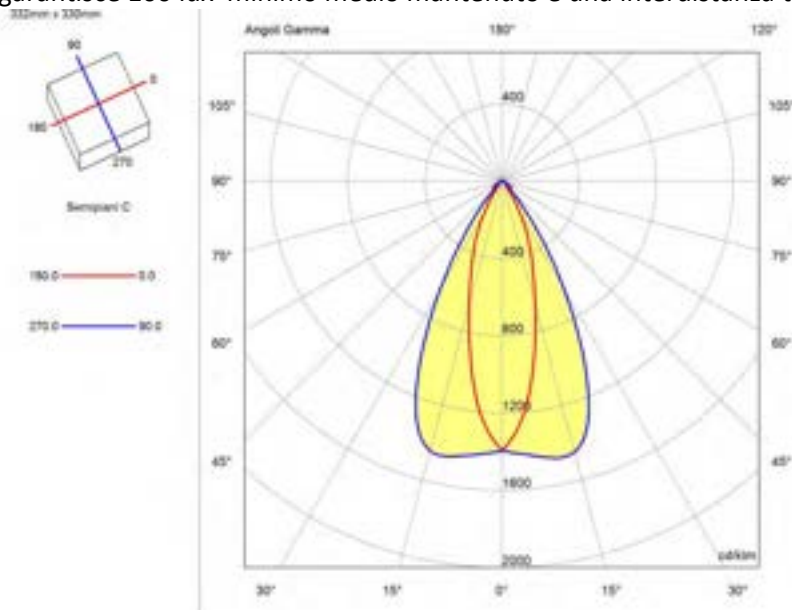
Per quanto riguarda le distribuzioni fotometriche, di norma i costruttori forniscono emissioni a fascio largo in cui occorre trovare un giusto compromesso tra limitazione dell'abbagliamento<sup>8</sup> e uniformità della distribuzione (il fattore di utilizzazione di questo genere di apparecchi è di norma sufficientemente elevato) e distribuzioni a fascio stretto (anche asimmetriche) adatte all'illuminazione degli scaffali.



**Figura 13 Distribuzione fotometrica nei due piani C0-180° e C90-270° dell'apparecchio Zumtobel GRAFT a fascio largo**

<sup>8</sup> Secondo le indicazioni del costruttore l'apparecchio a GRAFT a fascio largo garantisce UGR<22 (X=8H,Y=8H,s=0.25H)

Per esempio l'apparecchio GRAFT di Zumtobel<sup>9</sup>, installato ad un'altezza di 15 m metri dal pavimento garantisce 100 lux minimo medio mantenuto e una interdistanza tra i singoli apparecchi di 15 metri.



**Figura 14 Distribuzione fotometrica nei due piani C0-180° e C90-270° dell'apparecchio Zumtobel GRAFT a fascio stretto**

L'apparecchio risulta adatto all'illuminazione di magazzini con scaffalature, dove oltre a garantire i valori di illuminamento sul piano del pavimento, occorre assicurarsi che siano rispettati i valori di illuminamento e di uniformità sui piani verticali.

- Apparecchi realizzati mediante soluzioni retrofit di modelli già esistenti, dove si è sostituita la lampada a scarica con un LED COB e si sono ottenute le diverse distribuzioni fotometriche attraverso opportune combinazioni di riflettori e di schermi di chiusura prismaticizzati (Figura 15).

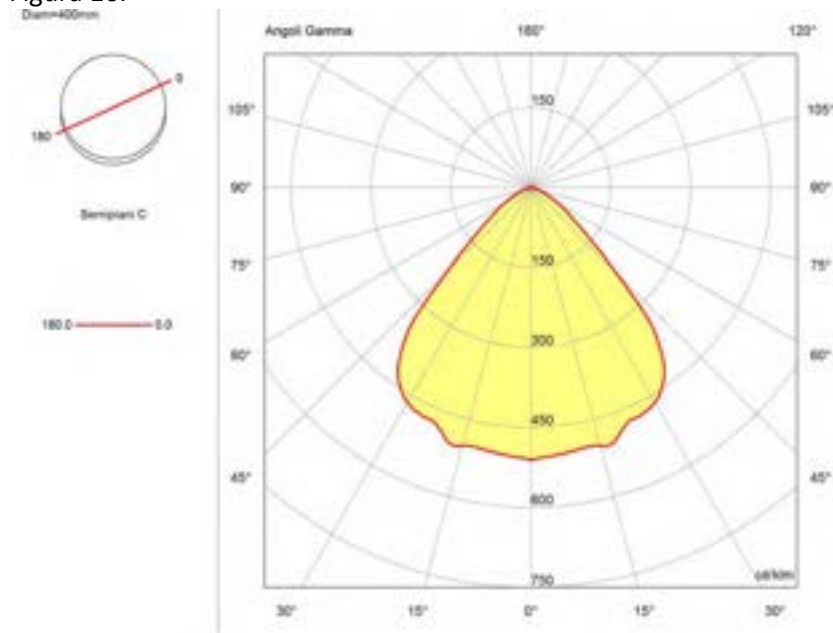


**Figura 15 Esempio di apparecchio (DISANO 3117 Ghost LED ) che ricalca lo schema di un prodotto tradizionale per illuminazione industriale**

Anche questa soluzione garantisce una discreta modularità nel flusso luminoso (anche se ridotta rispetto al caso precedente), un buon confort in termini di contenimento dell'abbagliamento, una grande semplicità

<sup>9</sup> Secondo le indicazioni fornite dal costruttore

ed economicità costruttiva. La distribuzione fotometrica dell'apparecchio della Figura 15 è riportato alla Figura 16.



**Figura 16** Indicatrice di emissione dell'apparecchio DISANO 3117 Ghost LED

Il principale svantaggio della soluzione consiste nella scarsa flessibilità nel poter variare la distribuzione fotometrica per adattarsi ai diversi contesti applicativi rispetto alla soluzione descritta in precedenza.

- Una terza soluzione consiste nell'impiego di un COB e di una lente free-form silconica al fine di ottenere la distribuzione fotometrica desiderata: questa soluzione offre alcuni vantaggi aggiuntivi rispetto alle soluzioni precedenti quali l'assenza di uno schermo di protezione, la possibilità di ottenere elevati gradi di protezione del compartimento ottico in modo semplice<sup>10</sup>, elevata stabilità nei confronti della componente UV e buona resistenza alle elevate temperature (nessun fenomeno di ingiallimento o di opacizzazione del componente).

L'adozione di una lente in materiale silconico comporta una serie di benefici e semplificazioni nel design del prodotto a fronte di un maggiore costo di produzione (ad oggi queste lenti trovano applicazione prevalente nell'illuminazione stradale, ma alcuni costruttori hanno reso disponibili sul mercato anche lenti con distribuzioni fotometriche adatte agli interni).

<sup>10</sup> Il valore di efficienza di alcuni di questi dispositivi risulta confrontabile con quello di lenti free-form in PC



**Figura 17 Esempio di lenti silconiche prodotte da due differenti costruttori: a sinistra FN13323\_STELLA-A (Ledil) e a destra PL1766SR di Kathod**

L'adozione di questa soluzione progettuale comporta la concezione di un prodotto costituito da pochi componenti (il numero delle sorgenti si riduce drasticamente, così pure il numero delle ottiche da accoppiare a ciascuna di esse, non si ha più la necessità di uno schermo di chiusura per garantire il grado di protezione IP desiderato, non si ha la necessità di progettare un MCPCB perché l'utilizzo di sorgenti COB porta con se l'adozione di holder plastici più facili da montare che non necessitano di operazioni manuali di saldatura dei cavi.) in cui la modularità e la flessibilità nel flusso luminoso emesso dall'apparecchio risiede nella scelta del COB più appropriato (eventualmente in numero maggiore dell'unità) in termini di potenza specifica e in base al tipo di lente adottata<sup>11</sup>.

I COB sono sorgenti già da tempo molto utilizzate per la costruzione di apparecchi di interni e quindi sono disponibili prodotti con adeguati indici di resa cromatica, elevato range di temperature di colore (anche se rivolte prevalentemente verso i toni caldi) e ridotti problemi di binning.

I principali ostacoli alla diffusione di questa soluzione sono i costi ancora elevati delle lenti silconiche e la ridotta disponibilità di distribuzioni fotometriche rispetto alle lenti free-form per power LED.

<sup>11</sup> Alcuni costruttori forniscono la distribuzione fotometrica relativa a famiglie di COB (indipendentemente dal costruttore del componente) classificate in base alla dimensione dell'area emittente.

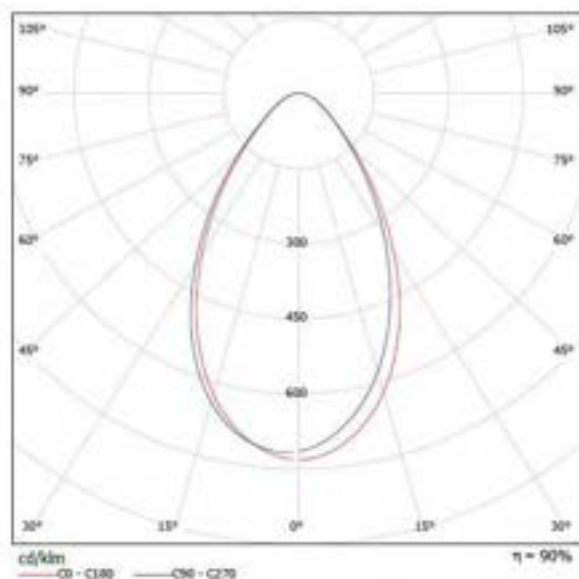


Figura 18 Lente CN13990\_SAGA-HB-IP-WHT (Ledil) per illuminazione industriale. A sinistra la distribuzione fotometrica (fonte:Ledil) della lente nei piani C=0-180° e C=90-270°

## 2.9 Apparecchi a LED e abbagliamento

L’abbagliamento è definito come la sensazione prodotta dalla luminanza all’interno del campo visivo che risulta sufficientemente maggiore della luminanza alla quale sono adattati gli occhi dell’osservatore per causare disagio, fastidio o riduzione della prestazione visiva o della visibilità<sup>12</sup>.

Si distinguono due tipi di abbagliamento:

- Discomfort glare che produce una sensazione fastidiosa e disagio (spesso anche denominato abbagliamento psicologico): spesso questo tipo di abbagliamento non produce una riduzione delle performance visiva, ma deve essere contenuto (nella progettazione dell’impianto e nella costruzione degli apparecchi) in quanto è causa di sintomi psicologici e fisiologici di disagio come lo stress e il mal di testa.
- Disability glare produce una riduzione della visibilità del compito visivo ed è spesso chiamato anche abbagliamento fisiologico.

Nella progettazione degli impianti è molto importante prevenire l’abbagliamento psicologico dal momento che questo si manifesta per valori della luminanza delle sorgenti/apparecchi più bassi rispetto all’altro: il suo contenimento porta con se anche il soddisfacimento dei limiti sull’abbagliamento fisiologico.

Di norma l’abbagliamento di un impianto di illuminazione in interni viene valutato attraverso il calcolo di un indice UGR (Unified Glare Rating) definito all’interno della pubblicazione CIE 117 (Discomfort glare in interior lighting) e che nasce da un precedente indice CGI (CIE Glare Index Formula) definito all’interno della pubblicazione CIE 55<sup>13</sup>.

$$UGR = 8 * \log \left( \frac{0.25}{L_B} \sum \frac{\omega_i L_i^2}{p_i^2} \right)^{14}$$

Il grado di confort varia tra 7 (insensitive) a 31 (unbearable) e l’equazione che lo esprime mette in relazione il valore della luminanza  $L_i$  delle parti luminose di ciascun apparecchio di illuminazione nel campo visivo

<sup>12</sup> Rea MS. The IESNA Lighting Handbook Reference and Application. 9th Edition, New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000.

<sup>13</sup> Commission Internationale de l’Eclairage. Discomfort Glare in the Interior Working Environment. Vienna: CIE, 1983.

<sup>14</sup> Nella formula il logaritmo è in base 10

dell'osservatore, la luminanza del background  $L_B^{15}$  ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ), l'angolo solido  $\omega_i$  sotto cui sono osservate le parti luminose dell'apparecchio di illuminazione ( $\text{sr}$ ), e l'indice di Guth  $p_i$  per ciascun apparecchio di illuminazione che rappresenta un fattore correttivo in funzione del disassamento di un apparecchio rispetto alla direzione dello sguardo dell'osservatore.

La formula (considerando ad esempio per semplicità il caso di un solo apparecchio) dice che l'indice aumenta al crescere della luminanza dell'apparecchio e dell'angolo solido sotto il quale è osservato e diminuisce al crescere della luminanza del background.

La rapida diffusione delle sorgenti allo stato solido ha fatto che si che alcuni ricercatori si siano posti il problema del legame tra illuminazione a LED e abbagliamento: le piccole dimensioni delle sorgenti (spesso viste come un vantaggio per realizzare prodotti compatti e dalle forme inusuali) potenzialmente possono rappresentare uno svantaggio per il contenimento dell'abbagliamento.

Supponendo che le sorgenti siano organizzate in una disposizione lineare o a matrice, la luminanza dell'apparecchio appare spazialmente assai poco uniforme e questo comporta problemi di abbagliamento. Molti apparecchi di illuminazione hanno luminanze non uniformi, in modo particolare quelli che utilizzano riflettori speculari con sorgenti tradizionali e quelli che impiegano matrici di LED: questo rende difficile definire l'area della sorgente di abbagliamento e di conseguenza l'angolo solido sotteso. Per le sorgenti di abbagliamento, il metodo convenzionale per il calcolo della luminanza consiste nel moltiplicare l'intensità luminosa in una data direzione per la proiezione dell'area luminosa dell'apparecchio nella direzione assegnata: se la definizione di area luminosa è ambigua, lo sarà anche il valore di luminanza calcolato. Anche supponendo che l'area sia correttamente definita, ci sono dubbi che la luminanza media calcolata con il metodo indicato sia un buon parametro per la valutazione dell'abbagliamento di sorgenti luminose non uniformi<sup>2</sup>.

La pubblicazione CIE 146:2002 e CIE 147:2002<sup>16</sup> fornisce alcuni suggerimenti su come trattare le sorgenti a luminanza non uniforme, anche se non si fa riferimento direttamente a sorgenti a LED e l'accuratezza delle relazioni proposte risulta non molto elevata (the approximation "does not claim great accuracy").

La suddivisibilità e additività delle sorgenti di abbagliamento rappresentano un problema fondamentale in tutti gli indici. La suddivisibilità delle sorgenti significa chiedersi se una singola sorgente di grandi dimensioni è suddivisibile in un numero arbitrario di sorgenti più piccole per facilitare il calcolo: il risultato dovrà essere indipendente dal numero delle suddivisioni. Allo stesso modo se un numero discreto di sorgenti sono valutate singolarmente sommandone gli effetti al fine di determinare l'effetto di abbagliamento molesto, allo stesso risultato si dovrebbe pervenire considerando le sorgenti come un unico. L'additività della percezione di abbagliamento di sorgenti multiple è un aspetto molto importante per sommare l'effetto di abbagliamento di tutte le sorgenti presenti nel campo di vista: quando un osservatore è esposto simultaneamente, nello stesso istante, a più sorgenti discrete di abbagliamento, egli percepirà le sorgenti simultaneamente, come un unico e non in modo sequenziale, una ad una, come si suppone avvenga nella schematizzazione di calcolo della maggior parte degli indici. Anche quando un osservatore guarda in direzione di una sorgente, la sensazione di abbagliamento dipenderà anche dalle altre sorgenti periferiche.

Anche se a prima vista i due problemi potrebbero essere risolti allo stesso modo<sup>17</sup> (la suddivisibilità delle sorgenti è un caso particolare dell'additività della sensazione di abbagliamento), si tratta di due concetti profondamente differenti.

La suddivisione delle sorgenti è spesso usata per facilitare il calcolo degli effetti dell'abbagliamento di una singola sorgente estesa, ad esempio attraverso l'elaborazione di una immagine HDR, mentre la proprietà di

---

<sup>15</sup> La luminanza del background è definito come la luminanza uniforme dell'intero ambiente che produce lo stesso illuminamento sul piano verticale all'altezza degli occhi dell'osservatore del campo visivo in esame escludendo le sorgenti di abbagliamento. La luminanza di background è di norma calcolata a partire dal valore di  $E_i$  (illuminamento indiretto agli occhi dell'osservatore, espresso in lux)

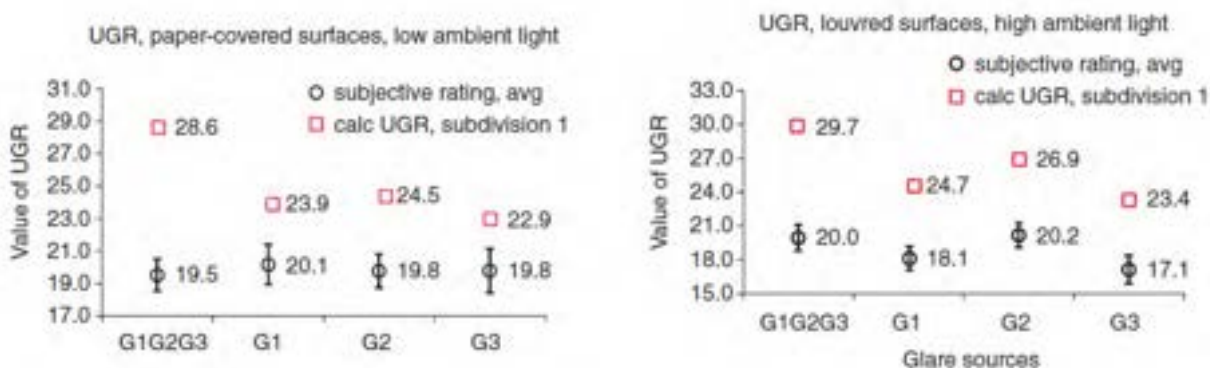
<sup>16</sup> CIE collection on Glare (2002)

<sup>17</sup> Einhorn HD. Unified glare rating: merits and application to multiple sources. *Lighting Research and Technology* 1998; 30: 89–93.

additività viene utilizzata per valutare l'effetto complessivo di un numero discreto di sorgenti di abbagliamento<sup>3</sup>.

Sulla base degli esperimenti di laboratorio condotti da Cai et al. i risultati ottenuti in merito alla suddivisibilità e additività delle sorgenti, utilizzando i principali indici di abbagliamento definiti in letteratura sono i seguenti:

- UGR,CGI,BGI,VCP mostrano additività nella sensazione di abbagliamento di sorgenti discrete multiple a luminanza non uniforme, con un range di valori per l'indice di posizione  $p$ .
- A UGR e CGI è applicabile con sufficiente accuratezza il criterio di suddivisione delle sorgenti nella sensazione di abbagliamento, mentre ciò non accade per l'indice VCP e BGI quando viene calcolato utilizzando il metodo di calcolo per pixel (con immagini HDR). Questo suggerisce che questi due indici non sono adatti a quantificare l'abbagliamento prodotto da sorgenti a luminanza non uniforme, quando il metodo di calcolo adottato è quello "per pixel"
- Tutti gli indici (UGR,CGI,BGI,VCP) sovrastimano la sensazione di abbagliamento prodotta da sorgenti a luminanza non uniforme<sup>18</sup>, rispetto al giudizio espresso da soggetti giovani con normali capacità di acuità visiva e cromatica



**Figura 19** Le valutazioni di abbagliamento soggettivo per differenti sorgenti a luminanza non uniforme (riportate nella scala dell'indice UGR) rispetto ai valori calcolati per via numerica a partire dalle immagini HDR, con suddivisione pari a 1.

- La scarsa accuratezza degli indici (UGR,CGI,BGI,VCP) nella predizione dell'abbagliamento non uniforme per sorgenti di illuminazione reali, è indipendente dal grado di non uniformità delle superfici che generano il fenomeno

Altri ricercatori Tashiro et al. hanno condotto esperimenti per valutare la relazione quantitativa tra giudizio soggettivo di abbagliamento molesto e alcune grandezze fotometriche di apparecchi di illuminazione a LED, con diverso arrangiamento delle sorgenti luminose<sup>4</sup>.

I risultati possono essere riassunti nel modo seguente:

- La percezione di abbagliamento molesto (Glare Rating, abbreviato GR) prodotto da sorgenti a LED con luminanza non uniforme è maggiore rispetto a quello prodotto da sorgenti a luminanza uniforme a parità di illuminamento prodotto all'occhio dell'osservatore o di luminanza media dell'area effettiva di emissione.
- Se il numero di elementi in un apparecchio è mantenuto costante, cambiamenti nella dimensione all'interno di angoli di osservazione tra 0.4° e 5.0° non influenzano il giudizio sull'abbagliamento molesto

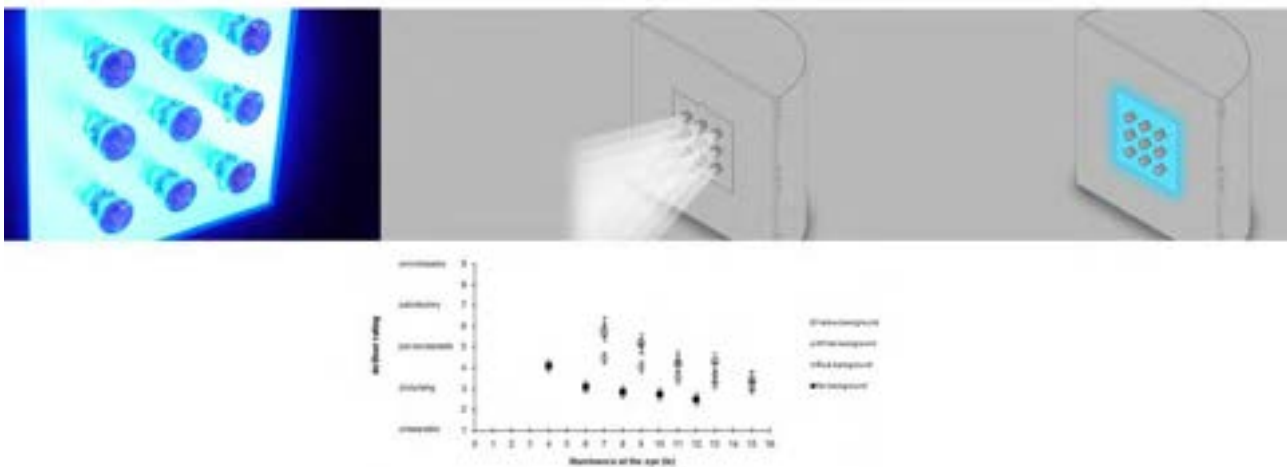
<sup>18</sup> I valori sono ottenuti da elaborazione numerica di una serie di immagini HDR, dopo aver opportunamente calibrato la macchina fotografica.



- Variazioni della densità spaziale delle sorgenti LED all'interno di un'area fissata (5.1x5.1, 7.6x7.6, 12.7x12.7 cm in un'area di 3.8°x3.8°) non influenza l'abbagliamento molesto
- Per un apparecchio a LED relativamente piccolo (all'interno dell'intervallo compreso tra 0.4° e 5.0x5.0°), con una elevata dis-uniformità della luminanza, il valore dell'illuminamento all'occhio dell'osservatore è un buon indicatore del GR: questo è vero anche per apparecchi con luminanza uniforme, ma i valori di illuminamento all'occhio dell'osservatore sono differenti nei due casi.

Un altro fattore trascurato nella formula UGR è il valore della luminanza nelle immediate vicinanze della sorgente di abbagliamento: il valore di luminanza nella zona intermedia tra la sorgente di abbagliamento e il background può essere utilizzato per ridurre la sensazione di abbagliamento dell'apparecchio<sup>5</sup>.

Nessuna delle metriche attuali considera il valore della luminanza nella regione immediatamente più prossima a quella della sorgente di abbagliamento, anche se ci sono indizi che sia il valore di luminanza, che il colore della luce, influenzino la sensazione di abbagliamento<sup>6</sup>.



**Figura 20** Descrizione dell'apparato sperimentale (in alto) e risultati ottenuti (in basso)

L'apparato sperimentale utilizzato da Sweater Hickcox et al. era costituito da un scatola luminosa semicilindrica che fungeva da camera di miscelazione. La luce di sfondo che circondava la matrice LED a luce bianca poteva essere variata mediante tre sorgenti LED rossi (picco lunghezza d'onda 635 nm), verde (picco lunghezza d'onda di 525 nm), e blu (lunghezza d'onda di picco 465 nm), posti sulla parte interna del semi-cilindro. Le condizioni di sfondo giallo (CIE 1931  $x = 0,459$  ;  $y=0,497$ ) erano state create miscelando LED rossi e verdi, mentre la condizione sfondo bianco era stata creata utilizzando PC LED bianchi (CIE 1931  $x=0,325$ ;  $y=0,325$ ).

La luce dello sfondo era osservata attraverso una lastra acrilica diffondente montata di fronte dell'apparecchio.

La matrice di LED a luce bianca che ha agito come fonte abbagliamento per questo esperimento, era composta di nove PC LED 6500 K, (3W).

Ciascun LED era equipaggiato con una lente (10° apertura) montata direttamente sullo schermo di diffusione in modo che la luce di sfondo brillasse uniformemente intorno e tra le sorgenti che componevano la matrice LED. La cromaticità nello spazio CIE (x,y) 1931 della matrice di LED bianca era  $x = 0.280$ ,  $y = 0,320$ .

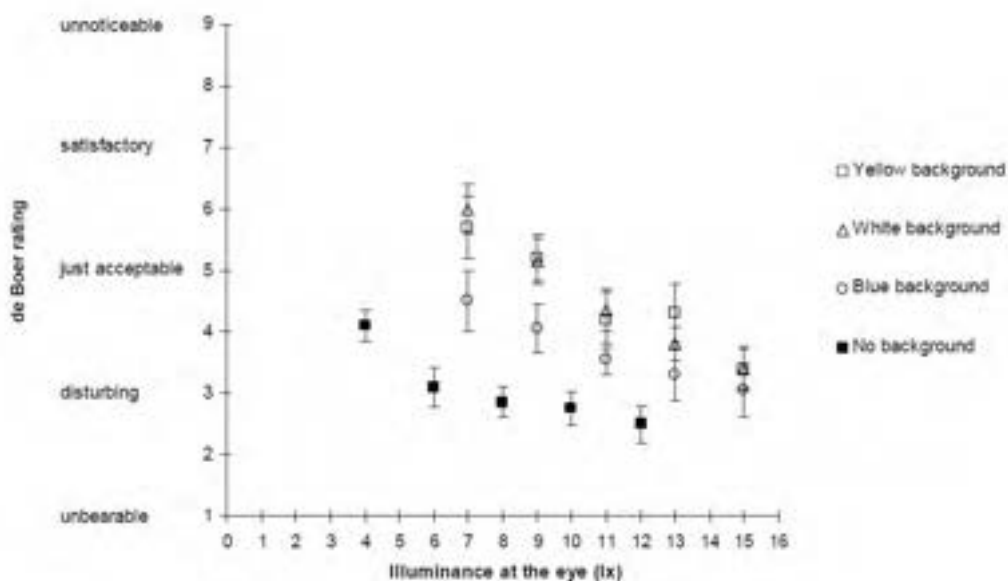
Nella Figura 21, il valore di illuminamento sull'occhio è riportato sull'asse delle ascisse, mentre il livello abbagliamento sull'asse delle ordinate (De Boer rating). Differenti condizioni sono state confrontate mediante test di varianza ANOVA e possiamo trarne le seguenti conclusioni:

- Vi è una significativa riduzione dell'abbagliamento percepito se il background luminoso (blu, giallo, bianco) viene aggiunto al led array
- Nessuna differenza tra uno sfondo giallo e bianco

- Significativa differenza tra blu e giallo nell'illuminazione del background (lo sfondo blu produce un ridotto miglioramento dell'abbagliamento molesto rispetto allo sfondo giallo, comunque maggiore rispetto all'assenza di sfondo).
- Lo studio sembra suggerire che l'abbagliamento psicologico possa essere ridotto mediante l'aggiunta di uno sfondo luminoso: questo potrebbe in futuro portare alla progettazione di apparecchi (basati su led array) che sfruttino opportunamente questo fenomeno.

Le principali limitazioni dello studio sono:

- L'esperimento è stato condotto solo in laboratorio con luce ambiente controllata e molto bassa
- Il livello di illuminazione del surround dell'apparecchio influenza la percezione dell'abbagliamento
- Che cosa succede se ci sono più apparecchi nel campo di vista dell'osservatore (l'efficacia rimane la stessa?)
- Scala utilizzata : poco intuitiva, al crescere del numero diminuisce l'abbagliamento molesto e occorre spiegare bene il vocabolario connesso alla scala ai soggetti coinvolti nel test (non deve esserci confusione)



**Figura 21 Confronto tra i valori di abbagliamento percepito (De Boer rating) e il livello di illuminamento all'occhio dell'osservatore per differenti colori della retro-illuminazione**

Infine vi è da considerare l'impatto della deviazione tra la linea di osservazione e la posizione della sorgente di abbagliamento: nel 2013, Clear ha comparato i valori originali dell'indice di posizione (Luckiesh e Guth, 1949), con risultati più recenti di altri ricercatori Kim et al. (2009), scoprendo che i due set di dati non corrispondono in maniera molto accurata. I fattori di posizione sono stati ottenuti (in entrambi gli studi citati) come rapporto tra le luminanze in una posizione arbitraria e sulla linea di osservazione che producono il medesimo livello di abbagliamento: gli osservatori regolano la luminanza delle sorgenti fuori asse fino a che raggiungono la stessa sensazione di abbagliamento della sorgenti di riferimento in asse.

I due esperimenti mostrano che in 19 casi su 20 i valori ricavati da Kim sono minori di quelli di L&G: le ragioni di questa differenza potrebbero essere molte, tra cui:

- Gli osservatori utilizzati da Kim sono tutti studenti Koreani, mentre i 10 soggetti dello studio L&G erano con ogni probabilità dipendenti del Lighting Research Laboratory della GE company: in letteratura sono stati documentati significative differenze nei risultati di esperimenti percettologici, quando vengono coinvolti soggetti con esperienza nel campo del lighting rispetto a soggetti che ne sono privi<sup>7</sup>
- Differenze culturali tra i due gruppi di osservatori
- Per l'esperimento di Kim et al. la varianza delle risposte rispetto allo stesso soggetto è pari a 0.366, ma la variabilità inter-individuale è pari a 0.777, maggiore rispetto al dato riportato da L&G pari a 0.40
- Per lo stesso soggetto, esistono delle correlazioni tra i valori dell'indice di posizione per differenti direzioni di osservazione a testimonianza del fatto ciascun osservatore ha un proprio "pattern"

Da queste e altre considerazioni appare chiaro come ulteriori indagini in questo settore debbano essere svolte al fine di migliorare gli attuali indici di abbagliamento: non deve infatti stupire se l'indice UGR attuale fatica a prevedere in modo accurato la sensazione di abbagliamento provata dagli osservatori.

Asaki et al. hanno messo a confronto il giudizio medio di abbagliamento molesto di 61 osservatori (5 esperti e 56 non esperti del settore) e i valori calcolati per la stessa direzione di osservazione in un'installazione di ufficio simulato, utilizzando 10 apparecchi con i bordi luminosi in modo che fosse possibile simulare l'effetto di diverse distribuzioni fotometriche. Il coefficiente di correlazione tra il valore medio di UGR calcolato e quello ricavato dal giudizio degli osservatori (espressi nella stessa scala dell'indice UGR) risulta elevato 0.95, ma con un valore molto elevato della deviazione standard tra le risposte dei diversi osservatori, come mostrato dalle barre della Figura 24. Dall'esame della stessa figura, appare inoltre chiaro che esiste sempre un "bias" tra i valori previsti dal calcolo dell'indice e la risposta media degli osservatori: in particolare le risposte degli utenti indicano un valore di abbagliamento molesto sempre inferiore a quello previsto dall'indice UGR, come si evince dalla Figura 24. Le spiegazioni possibili di questi risultati potrebbero essere molteplici: l'autore dello studio ipotizza che la ragione potrebbe essere il modo in cui viene combinato l'abbagliamento prodotto da sorgenti multiple e che la semplice somma dei contributi possa non essere la scelta migliore, oppure la spiegazione risiede nel fatto che la maggior parte degli osservatori fossero persone non esperte di lighting e che quindi meno sensibili a percepire le sorgenti di abbagliamento a differenza degli esperti (spiegazione bias tra valori previsti a calcolo e risposta media degli osservatori).

Vi è inoltre la possibilità che gli osservatori, tutti Giapponesi, avessero aspettative differenti rispetto al problema dell'abbagliamento dovuto al largo impiego di lampade fluorescenti lineari nude all'interno di ambienti destinati ad uffici (in Europa e in USA vi è un ridotto impiego di questa soluzione illuminotecnica nei luoghi di lavoro destinati a ufficio e quindi se l'esperienza fosse stata condotta in questi paesi avremmo avuto un diverso valore del bias tra predizione dell'indice e media dei giudizi soggettivi).

Altri studi, condotti in Cina, hanno mostrato come le stime prodotte dall'indice attuale siano superiori a quelle ottenute dal giudizio medio degli osservatori in un ambiente illuminato<sup>19</sup> da apparecchi con una distribuzione non uniforme di luminanze<sup>8</sup>.

---

<sup>19</sup> L'ambiente era reale e assimilabile ad un'aula scolastica, priva di finestre

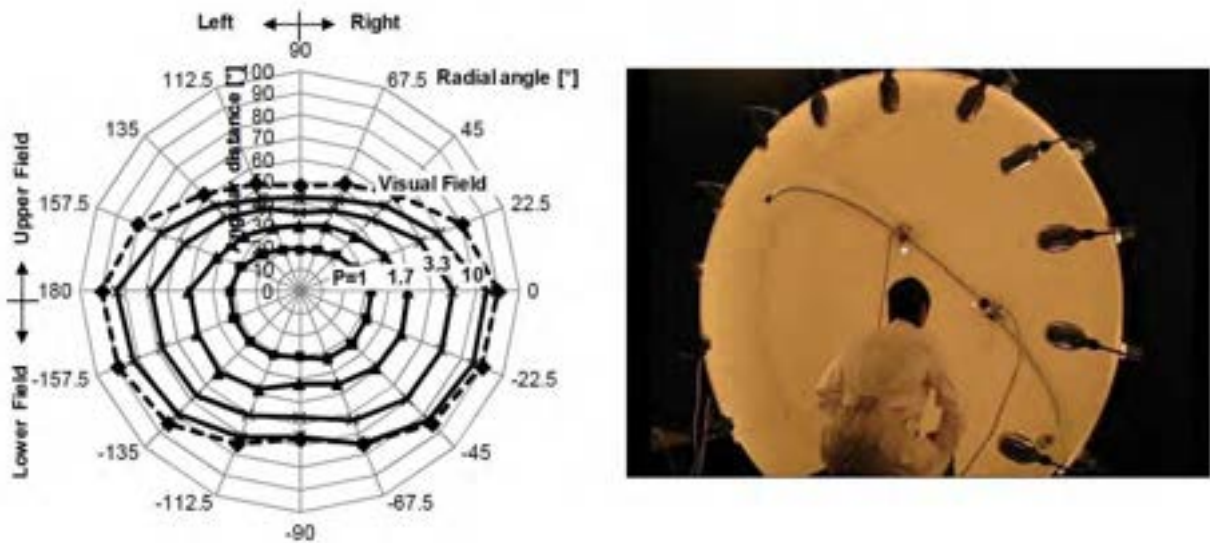


Figura 22 A destra apparato sperimentale per la determinazione dell'indice di posizione nell'intero campo visivo utilizzato da Kim et al. A sinistra l'andamento delle curve BCD (Borderline Between Comfort and Discomfort) di luminanza e i valori dell'indice di posizione

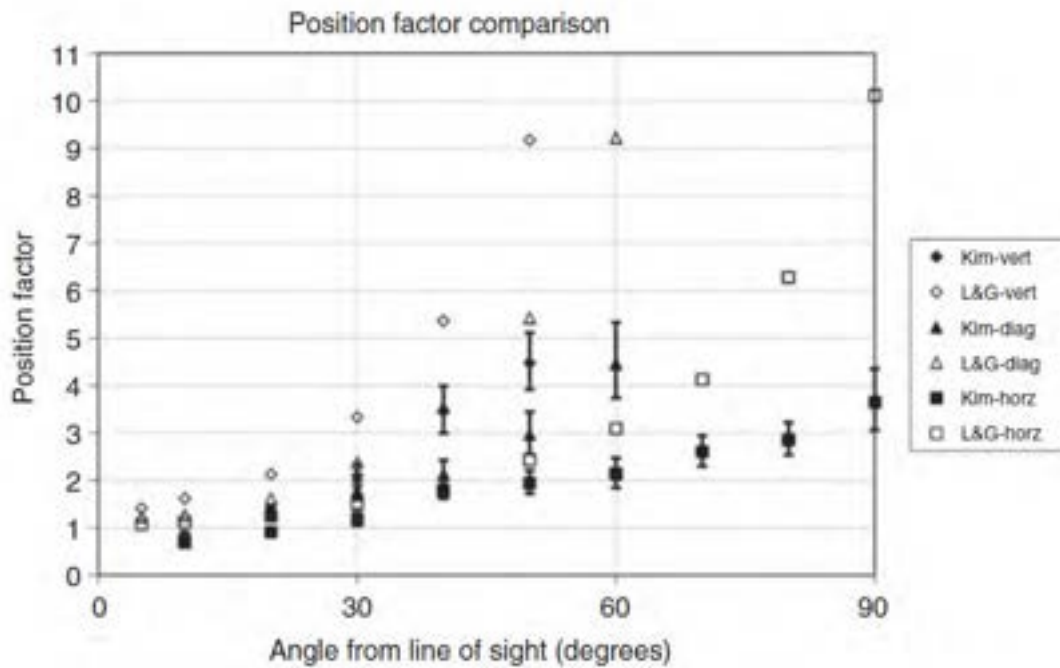
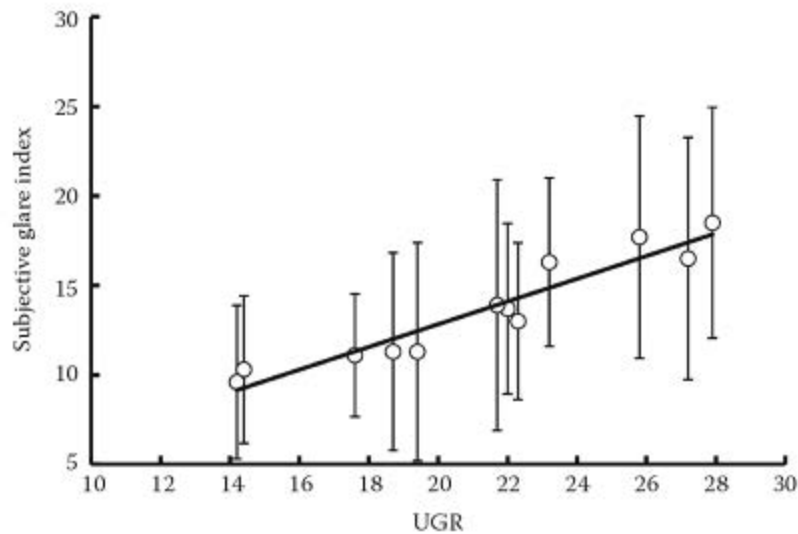


Figura 23 Fattori di posizione (BCD ( $\theta, \phi$ ) / BCD (0,0)) dell' esperimento L & G (simboli aperti) e dell' esperimento di Kim et al. (simboli pieni). Per Kim et al. i dati riportano anche l'indicazione della barra di errore  $\pm 1$  deviazione standard (BCD: confine tra comfort e disagio; L & G: Luckiesh e Guth)



**Figura 24** Andamento del valore medio dell'indice di abbagliamento soggettivo e la relativa deviazione standard relativi a un ambiente ad uso ufficio illuminato in modi differenti rispetto ai valori previsti dall'indice UGR per la stessa direzione di osservazione e per il medesimo locale. Le barre d'errore rappresentano le variazioni individuali nelle risposte e risultano molto elevate.

I valori dell'indice di Guth per deviazioni verticali della direzione di osservazione al di sopra della linea dell'orizzonte, sono di norma limitate ad angoli inferiori a 53°, perché si assume che non ci sia sensazione di abbagliamento per angoli maggiori.

Tuttavia, l'esperienza ed esperimenti di laboratorio descritti in letteratura scientifica mostrano che se il valore di luminanza è sufficientemente elevato, si può ottenere una sensazione di abbagliamento per valori dell'angolo maggiori, anche quanto l'apparecchio si trova sopra la testa dell'osservatore al di fuori del suo campo di vista<sup>9</sup>. La ragione è che l'apparecchio, sebbene fuori dal campo di vista, produce elevati valori di luminanza sugli elementi che circondano gli occhi, come ad esempio sopracciglia, naso, guance, tutti i tipi di occhiali che sono indossati. I valori di queste luminanze si modificano ogni volta che viene mossa la testa creando distrazione. Il valore di soglia per il quale si innesca questo fenomeno, si aggirano nell'intorno di 16500 cd/m<sup>2</sup>, che è un valore di luminanza che può essere raggiunto da alcuni apparecchi a LED.

### 3 Capitolo A: Sviluppo sistema ottico per il motore luminoso HUMBLEBEE sviluppato da ENEA

#### 3.1 HumbleBee

Nel corso delle precedenti attività di Ricerca, ENEA ha sviluppato<sup>20</sup> un apparecchio per illuminazione di ambienti industriali denominato HumbleBee: a partire dal progetto sono stati realizzati da ENEA una serie di prototipi che sono stati utilizzati per sostituire gli apparecchi di illuminazione con lampada a scarica (a Vapori di Mercurio) presenti all'interno di un laboratorio di ricerca (Hall Tecnologica) presso la loro sede di Ispra.

<sup>20</sup> Con la collaborazione di Neri Illuminazione



Figura 25 Immagine di uno dei prototipi realizzati

L'apparecchio sviluppato comprende, oltre a una sorgente a fosfori remoti e al relativo sistema di alimentazione, un sistema di monitoraggio (HW/SW) e di controllo del flusso emesso in relazione alla luminosità dell'ambiente derivata dall'illuminazione naturale dell'edificio.

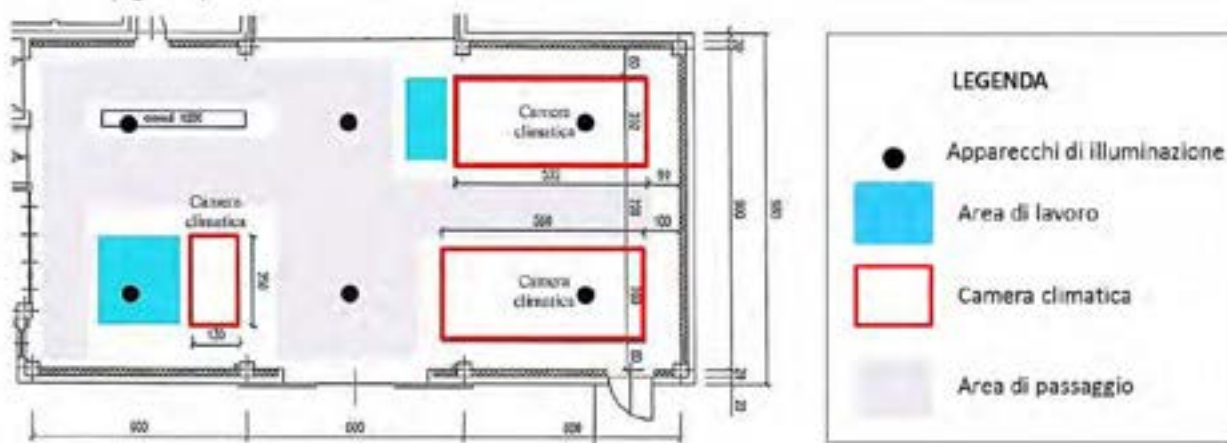


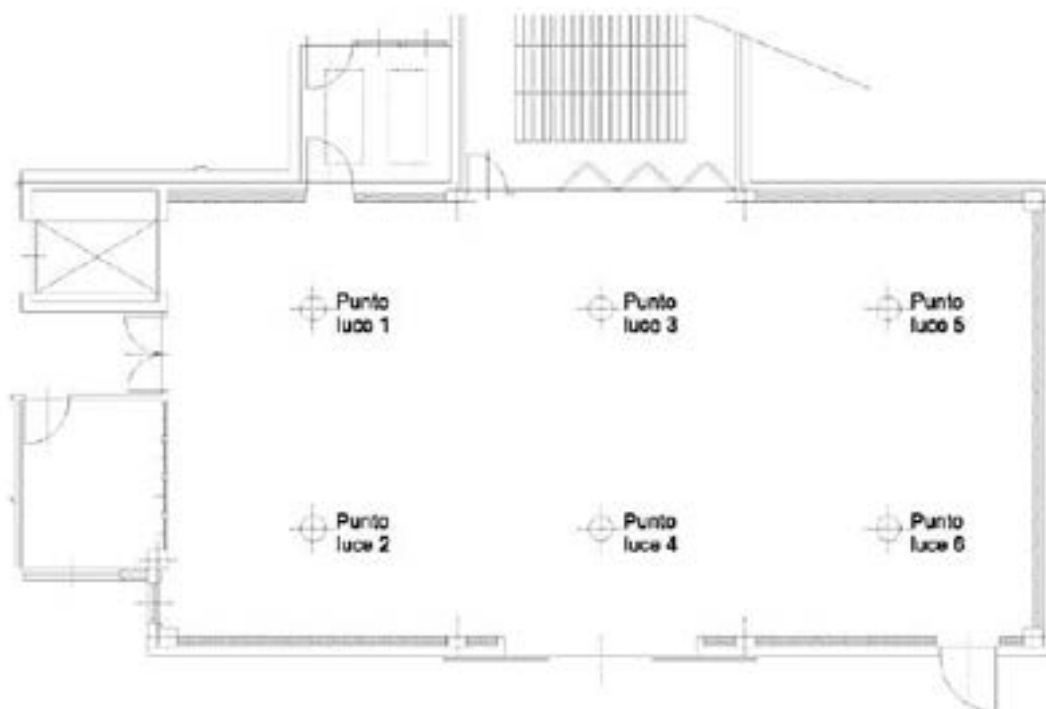
Figura 26 Planimetria della Hall Tecnologica : sono indicate le posizione degli apparecchi di illuminazione, le diverse aree di lavoro, il posizionamento delle attrezzature di prova e le aree di passaggio.



Figura 27 Immagine della Hall tecnologica

L'apparecchio è dotato di una sorgente luminosa a fosfori remoti con un flusso emesso di 22367.7lm e una efficienza di 110lm/W: per le successive valutazioni si è considerata la distribuzione fotometrica di una sorgente lambertiana con il flusso luminoso pari a 22.4Klm.

La potenza elettrica ricavata dal precedente report ENEA risulta pari a 202. 8W.



**Figura 28 Planimetria della Hall Tecnologica dove è stata prevista l'installazione di 6 apparecchi di illuminazione in sostituzione di quelli dotati di lampada a scarica**

La Hall Tecnologica è un locale di 18 x 9.4 metri, alto 7 metri, assimilabile ad un ambiente industriale. L'area di lavoro dei tecnici e dei ricercatori, che svolgono attività sperimentale, è focalizzata all'interno delle 3 camere climatiche e nelle due aree di lavoro (banchi da lavoro) utilizzate per la preparazione del materiale da testare (cfr. con Figura 26 e Figura 27).

I requisiti di progetto, in rapporto all'attività lavorativa svolta, desunti dall'applicazione della norma UNI EN 12464-1, sono il valore dell'illuminamento minimo medio mantenuto ( $E_m$ ) pari a 300 lx e l'uniformità  $U_0$ <sup>21</sup> di illuminamento sul compito visivo pari a 0,60.

La prima attività è stata la verifica dei risultati impiantistici mediante SW di simulazione illuminotecnica (Dialux), i cui risultati sono riportati alla Figura 29 e alla Figura 30: dal loro esame si osserva che l'impianto soddisfa i requisiti relativi al valor medio di illuminamento, alla sua uniformità (sia in presenza di arredi, sia con ambiente vuoto). Tuttavia, data la particolare distribuzione fotometrica e l'altezza di montaggio, si presume che qualche problema dovrebbe nascere per quanto riguarda la limitazione dell'abbagliamento, parametro valutabile mediante il calcolo dell'indice UGR.

Le posizioni degli osservatori<sup>22</sup> sono state scelte in modo opportuno sulla base di alcune fotografie dell'ambiente (cfr. Figura 28 e Figura 29) e di norma sono stati posti in corrispondenza di console e quadri di manovra delle attrezzature/apparecchiature presenti all'interno del laboratorio.

<sup>21</sup> Uniformità ( $U_0$ ) = Illuminamento minimo/Illuminamento medio ( $E_{min}/E_{max}$ )

<sup>22</sup> Gli osservatori sono stati considerati tutti in piedi

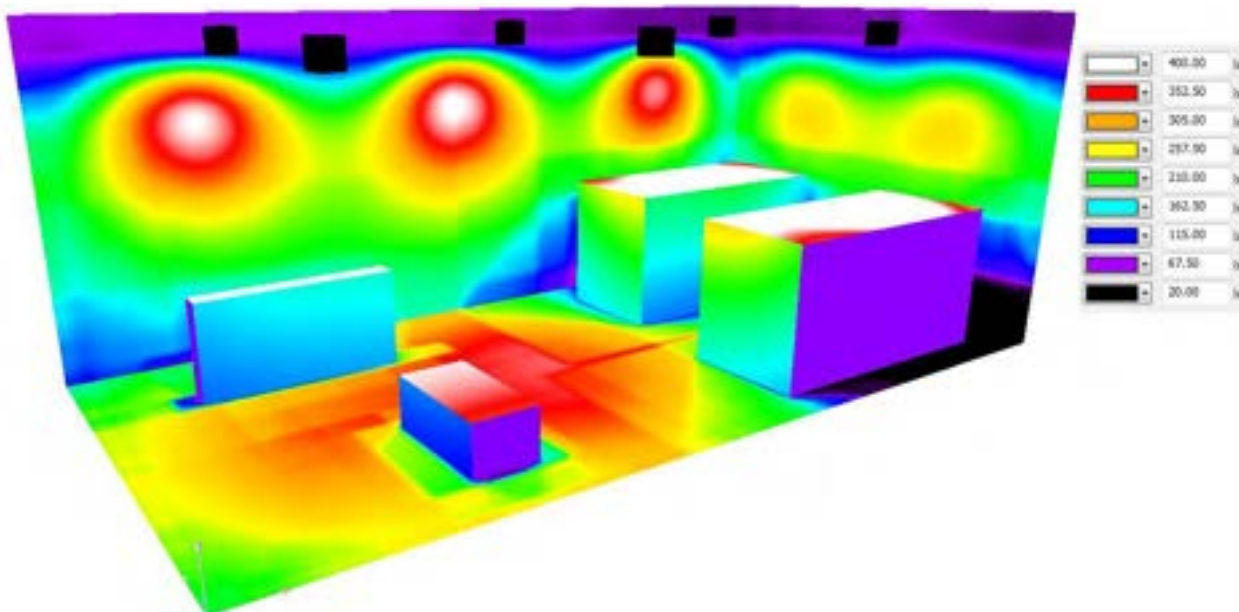
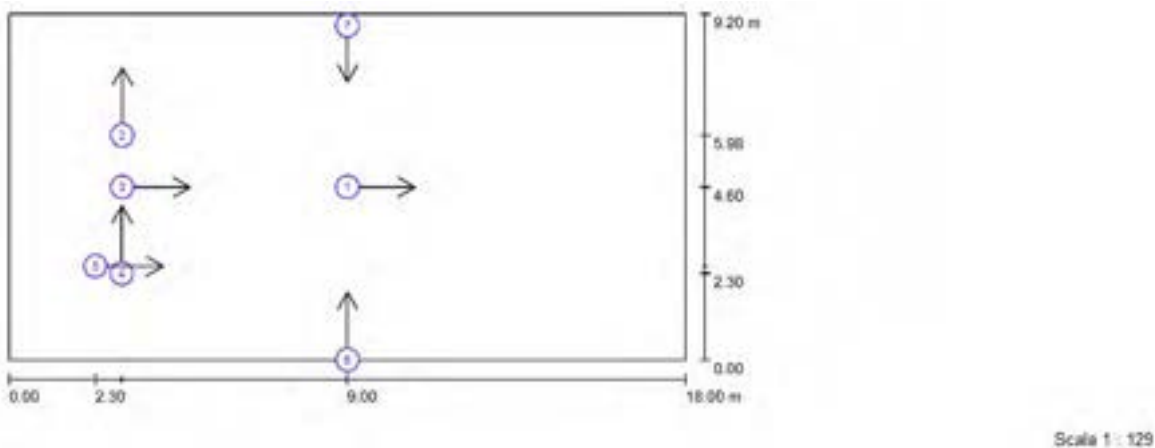


Figura 29 Immagine falsi colori Hall Tecnologica (apparecchio ENEA Humble Bee) in presenza di arredi



Elenco punti di calcolo UGR

No.	Denominazione	Posizione [m]			Linea di mira [°]	Valore
		X	Y	Z		
1	Punto di calcolo UGR 1	9.000	4.600	1.750	0.0	>30
2	Punto di calcolo UGR 1	3.013	5.975	1.750	90.0	/
3	Punto di calcolo UGR 1	3.013	4.600	1.750	0.0	>30
4	Punto di calcolo UGR 1	3.000	2.300	1.750	89.8	>30
5	Punto di calcolo UGR 1	2.300	2.500	1.750	-0.2	>30
6	Punto di calcolo UGR 1	9.000	0.000	1.750	90.0	>30
7	Punto di calcolo UGR 1	9.000	9.200	1.750	-90.0	>30

Figura 30 Posizionamento osservatori all'interno del locale per la valutazione UGR (sono stati considerati gli arredi)

Il valore di riferimento dell'indice UGR dovrebbe oscillare tra 19 e 25, ma per l'installazione considerata e la distribuzione fotometrica dell'apparecchio, i valori ottenuti sono maggiori di 30.

Per risolvere il problema occorre agire su due parametri contemporaneamente :

- Dimensione dell'area luminosa dell'apparecchio (nel caso considerato il diametro della sorgente a fosfori remoti risulta pari a 150 mm), in modo da ridurre il valore della luminanza nella direzione di osservazione
- Modificare la distribuzione fotometrica dell'apparecchio, in modo da creare un angolo di schermatura (cut-off) nella distribuzione delle intensità luminose.



Il legame tra aumento della superficie luminosa e riduzione del valore dell'indice UGR è dato dalla seguente relazione:

$$UGR(A) = UGR(A_0) - 8 * \log\left(\frac{A}{A_0}\right)$$

Dove  $A_0$  è l'area iniziale che da luogo al valore  $UGR(A_0)$  dell'indice, mentre  $UGR(A)$  rappresenta il valore che si otterrebbe aumentando l'area del rapporto  $A/A_0$ , a parità di ogni altro fattore (flusso, distribuzione delle intensità luminose). Il raddoppio del diametro della sorgente, comporterebbe una riduzione del valore di UGR di appena 2.4 punti, insufficienti a far rientrare l'impianto nei limiti fissati dalla norma.

La soluzione proposta dovrà essere un compromesso tra le seguenti esigenze:

- Preservare il valore medio di illuminamento (sul piano utile per i compiti visivi degli operatori alle diverse attrezzature e strumentazioni e sul piano del calpestio nelle zone di transito) e la sua uniformità
- Limitare l'abbagliamento quantificato mediante l'indice UGR
- La soluzione proposta dovrà essere semplice e di facile realizzazione, senza prevedere alcuna modifica di tipo meccanico o fotometrico agli apparecchi esistenti (si tratta sostanzialmente di prevedere un elemento aggiuntivo)
- Economica, dato che gli esemplari da realizzare dovranno essere sei, uno per ciascun apparecchio installato
- Prevedere un numero limitato di componenti aggiuntivi (per esempio in una soluzione con riflettore, occorre prevedere anche uno schermo di chiusura che garantisca un adeguato grado di protezione IP all'apparecchio)

Il primo passo è la definizione della distribuzione fotometrica che consenta il raggiungimento dei requisiti di illuminamento e di uniformità per lo schema impiantistico adottato: a tale scopo è stato preparato un foglio di Excel in cui, a partire dal valor medio e dall'uniformità e dalla sovrapposizione dell'effetto di 4 centri luminosi, si ricava l'indicatrice di emissione dell'apparecchio, supposto rotosimmetrico. Lo schema di calcolo tiene anche conto della posizione del cut-off per ridurre il rischio di abbagliamento.

La scelta di realizzare un apparecchio di illuminazione con questo tipo di simmetria, risponde alla necessità di realizzare una soluzione semplice ed economica, anche se non particolarmente performante dal punto di vista delle flessibilità impiantistica: alcuni costruttori sostengono che il migliore solido fotometrico possibile è quello che realizza isolux quadrate (o rettangolari) sul piano utile in modo da consentire una migliore sovrapposizione delle emissioni di apparecchi contigui (cfr. con la Figura 31 e la Figura 32).

Le dimensioni dell'area luminosa, sono state fissate sulla base dell'analisi di prodotti simili, in modo che il valore dell'abbagliamento per le posizioni degli osservatori della Figura 30 sia inferiore a 19 per ciascuna posizione di calcolo.

I risultati ottenuti per un ambiente privo di arredi, sono riportati alla Figura 34: le posizioni degli osservatori considerate sono le stesse del caso precedente al fine di rendere immediatamente confrontabili i risultati delle due simulazioni.

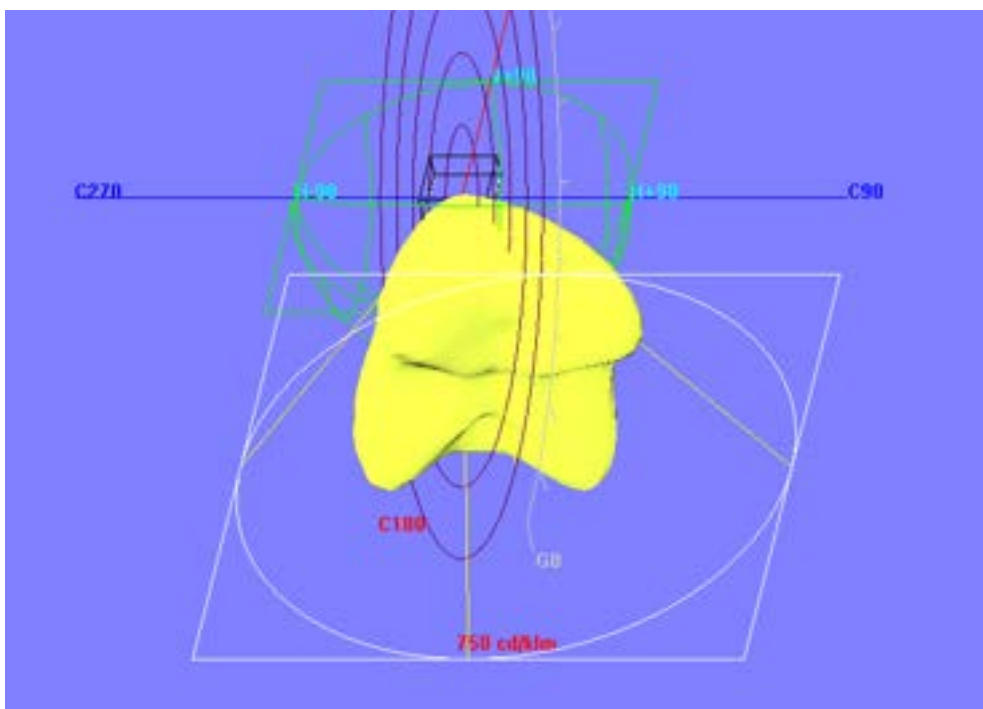


Figura 31 Solido fotometrico apparecchio Zumtobel GRAFT 140W LED765 L330 PM WB LDO WH

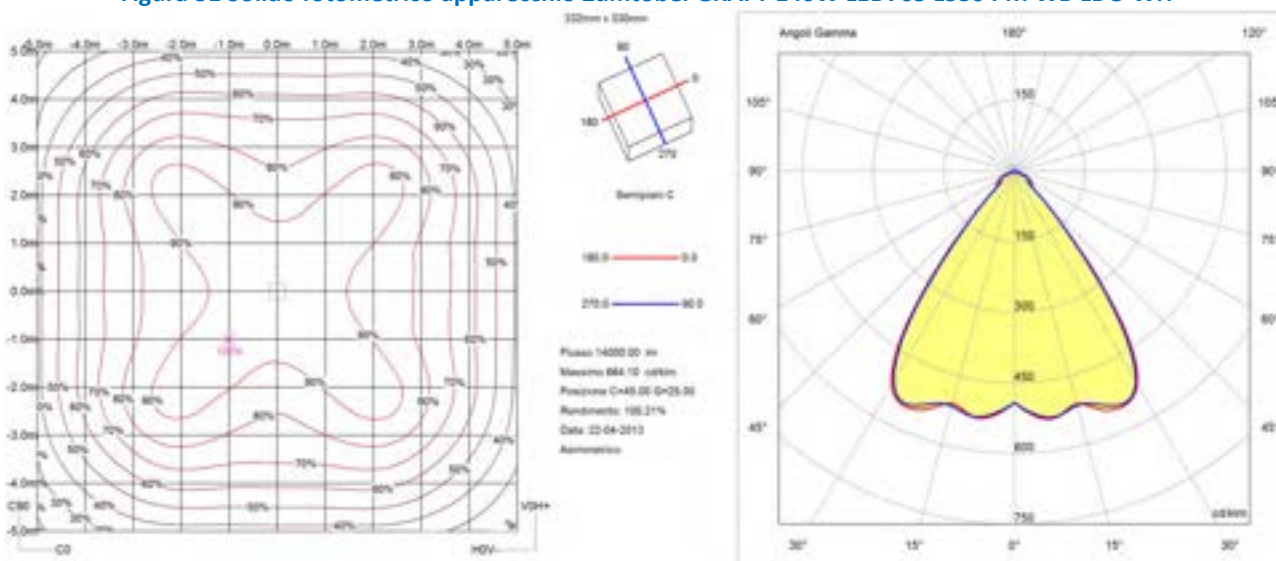


Figura 32 A sinistra sono riportate le curve Isolux relative all' apparecchio Zumtobel GRAFT 140W LED765 L330 PM WB LDO WH (apparecchio H=7 m) . Isolux sul pavimento in percentuale. A destra indicatrice di emissione dell'apparecchio nei due piani principali.

La curva fotometrica calcolata è quella riportata alla Figura 33, dove sono state tracciate anche le curve isolux sul pavimento (in percentuale), supponendo l'apparecchio posto ad una distanza di 7 m dal piano del calpestio.

Dal confronto tra la Figura 32e la Figura 33, si deduce che, a causa della simmetria della distribuzione, le curve isolux sono approssimativamente circolari, ma distribuite in maniera sufficientemente (spazialmente) uniforme all'interno del cerchio compreso tra la proiezione a terra della posizione dell'apparecchio (indicata nel grafico con una croce rossa) e la curva isolux al 60% del valore massimo.

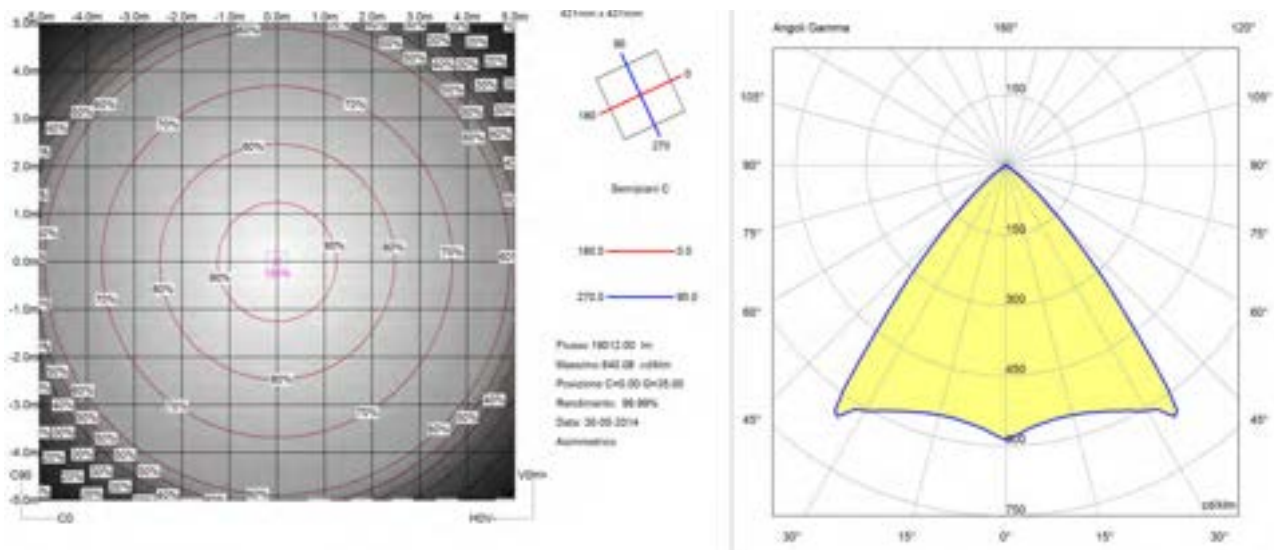
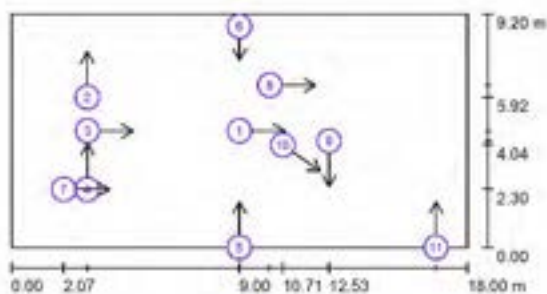


Figura 33 A sinistra sono riportate le curve Isolux relative alla distribuzione fotometrica di riferimento per Humble-Bee (apparecchio H=7 m). A destra l'indicatrice di emissione di riferimento (si ricorda che l'apparecchio gode di una simmetria di rotazione)

Per quanto riguarda il valore minimo medio mantenuto di illuminamento sul piano di lavoro (supposto alto 100 cm dal pavimento) e sul pavimento (in quanto considerato come zona di transito all'interno del laboratorio tra le diverse postazioni di misura), i risultati ottenuti sono riportati alla Figura 35 e alla Figura 36.



Scala 1 : 200

Elenco punti di calcolo UGR

No.	Denominazione	Posizione [m]			Linea di mira [°]	Valore
		X	Y	Z		
1	Punto di calcolo UGR 1	9.000	4.600	1.750	0.0	<10
2	Punto di calcolo UGR 1	3.000	5.924	1.750	90.0	/
3	Punto di calcolo UGR 1	3.013	4.600	1.750	0.0	12
4	Punto di calcolo UGR 1	3.000	2.300	1.750	89.8	19
5	Punto di calcolo UGR 1	9.000	0.000	1.750	90.0	<10
6	Punto di calcolo UGR 1	9.000	9.200	1.750	-90.0	<10
7	Punto di calcolo UGR 1	2.066	2.300	1.750	0.0	<10
8	Punto di calcolo UGR 1	10.200	6.400	1.750	0.0	16
9	Punto di calcolo UGR 1	12.532	4.200	1.750	-90.0	/
10	Punto di calcolo UGR 1	10.714	4.041	1.750	-35.0	17
11	Punto di calcolo UGR 1	16.757	0.000	1.750	90.0	<10

Figura 34 Valori UGR ottenuti con la distribuzione fotometrica proposta, relativi ad un ambiente privo di arredi

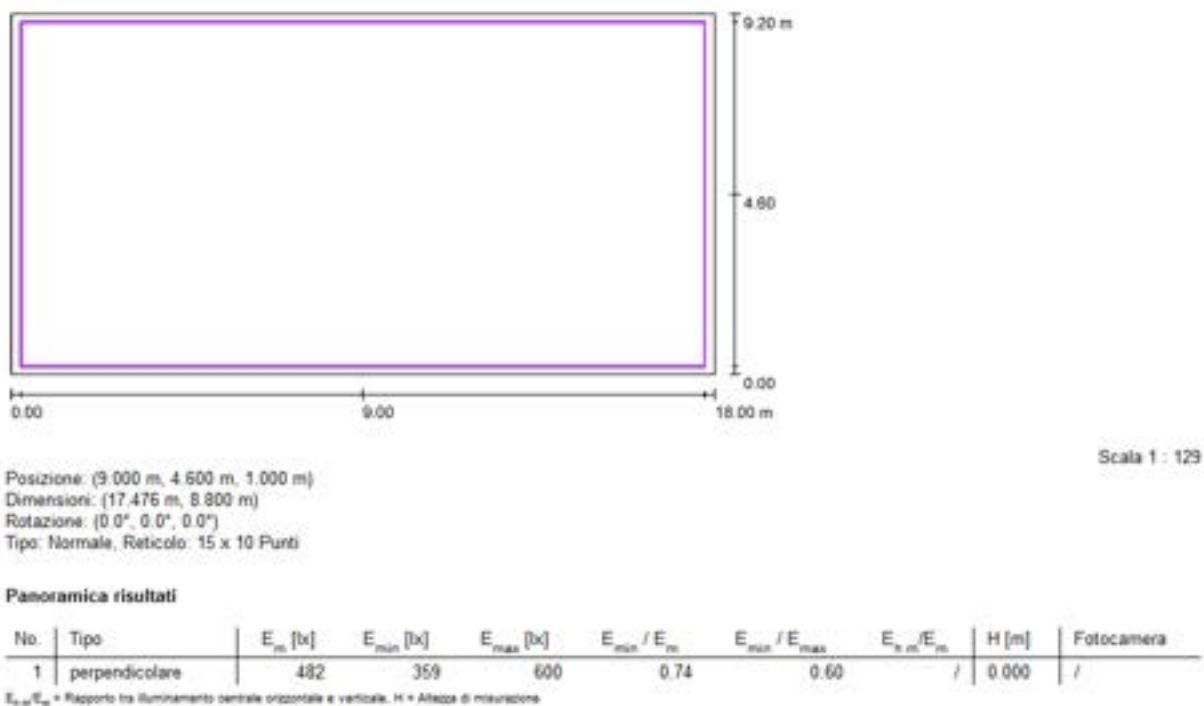


Figura 35 Riepilogo valori di illuminamento e di uniformità per il piano di lavoro a 100 cm dal pavimento

Dall’esame dei risultati impiantistici, si può concludere che la distribuzione fotometrica ipotizzata (sebbene di tipo rotosimmetrico) soddisfa i requisiti fissati inizialmente per l’illuminazione della Hall Tecnologica.

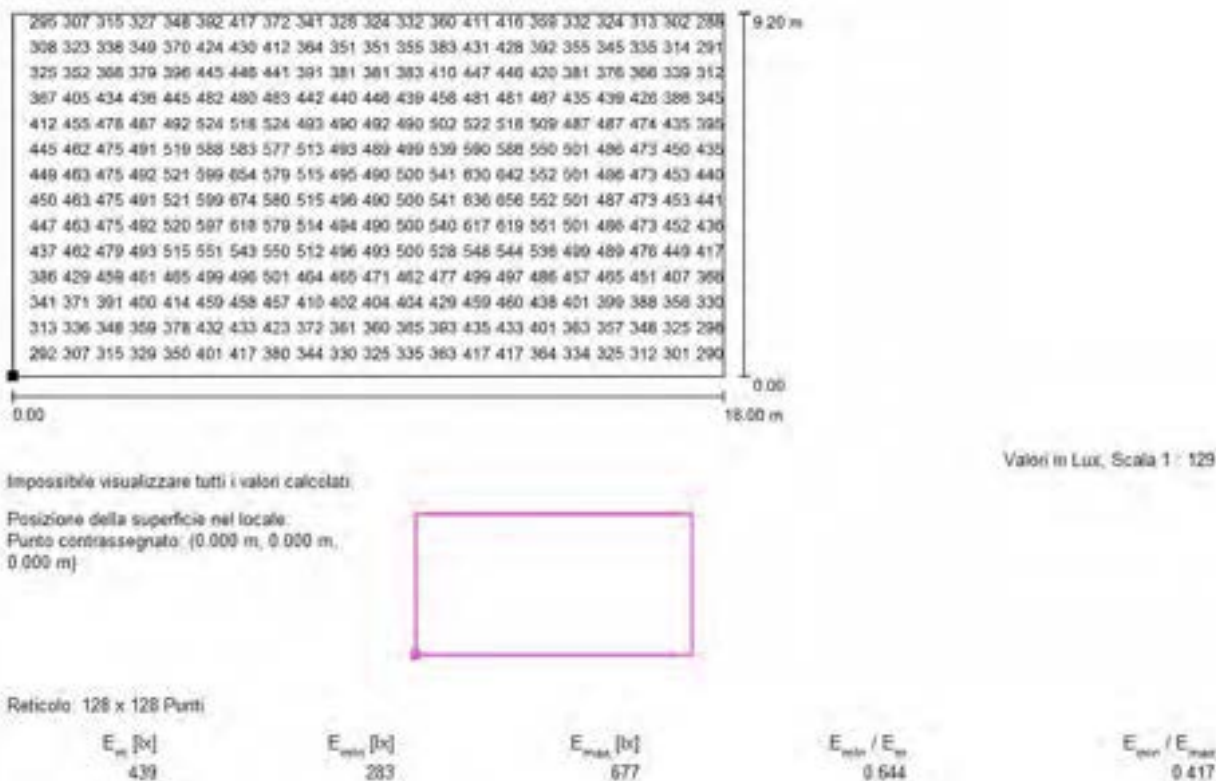


Figura 36 Riepilogo valori di illuminamento e di uniformità sul pavimento

Per quanto riguarda la soluzione realizzativa della distribuzione fotometrica ipotizzata, si ritiene che il miglior compromesso per il soddisfacimento di tutti i requisiti identificati all’inizio del paragrafo, sia la

realizzazione di un riflettore in alluminio e di uno schermo di chiusura piano per ottenere il grado di protezione contro l'ingresso di polveri desiderato.

Occorre infatti considerare che vi è l'esigenza di preservare nel tempo le caratteristiche riflettenti dell'ottica, di ridurre i costi di manutenzione per pulizia (che sarebbe disagiata a causa dell'ingombro delle attrezzature del laboratorio) e al contempo di contenere i costi di prototipazione evitando la necessità di stampi per realizzare schermi prismatici o lenticolari.

### 3.2 Progetto ottico

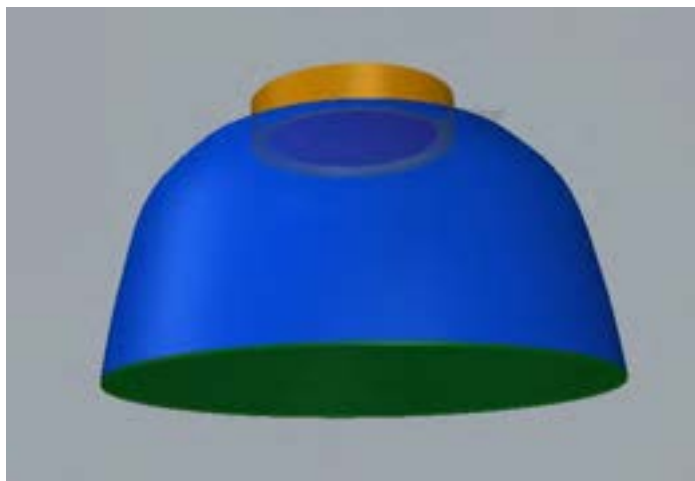
Sulla base delle considerazioni precedenti si è sviluppato un riflettore a simmetria roto-simmetrica che cercasse, per quanto possibile, di riprodurre la distribuzione fotometrica desiderata, ma conservando allo stesso tempo una geometria semplice, di facile produzione, ma soprattutto economica.

Nello studio della geometria del sistema ottico si è cercato di realizzare un profilo che lasciasse, per quanto possibile, libere le feritoie del sistema di dissipazione del calore poste ai lati della camera di miscelazione (confronta con la Figura 37).



**Figura 37** Dettaglio frontale HumbleBee, dove appaiono evidenti le feritoie del sistema di dissipazione

La geometria finale del sistema ottico (per quanto riguarda le sole superfici ottiche attive), comprensiva della camera per il fosforo remoto e dello schermo di chiusura, è riportata alla Figura 38.



**Figura 38 Geometria del riflettore per apparecchio per illuminazione industriale HumbleBee**

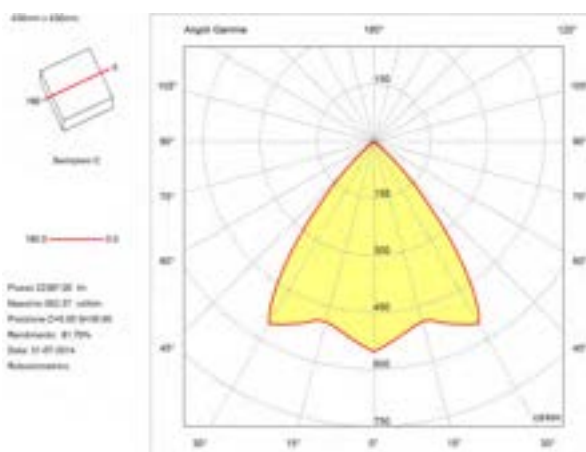
Utilizzando un sistema di ottimizzazione vincolata, è stato possibile ottenere la distribuzione fotometrica, le cui indicatrici di emissione nei due piani principali C0-180° e C90-270°, sono riportate alla Figura 39. Tale distribuzione fotometrica, tiene anche in considerazione l’effetto dello schermo di chiusura dell’ottica, che è stato previsto in materiale plastico (PC di 3 mm di spessore) e con un profilo piano in modo da rendere molto semplice ed economica la sua realizzazione.

Il riflettore dovrà essere realizzato in alluminio placcato utilizzando un materiale prodotto da ALMECO-SACALL (modello 106), le cui caratteristiche di riflessione sono state inserite all’interno del programma di simulazione attraverso la creazione di un appropriato modello di BRDF (ABg scatter model).

Le principali caratteristiche di riflessione del materiale impiegato sono:

- Assorbimento 13%
- Riflessione speculare a 60° di incidenza 80%
- Riflessione diffusa 7%

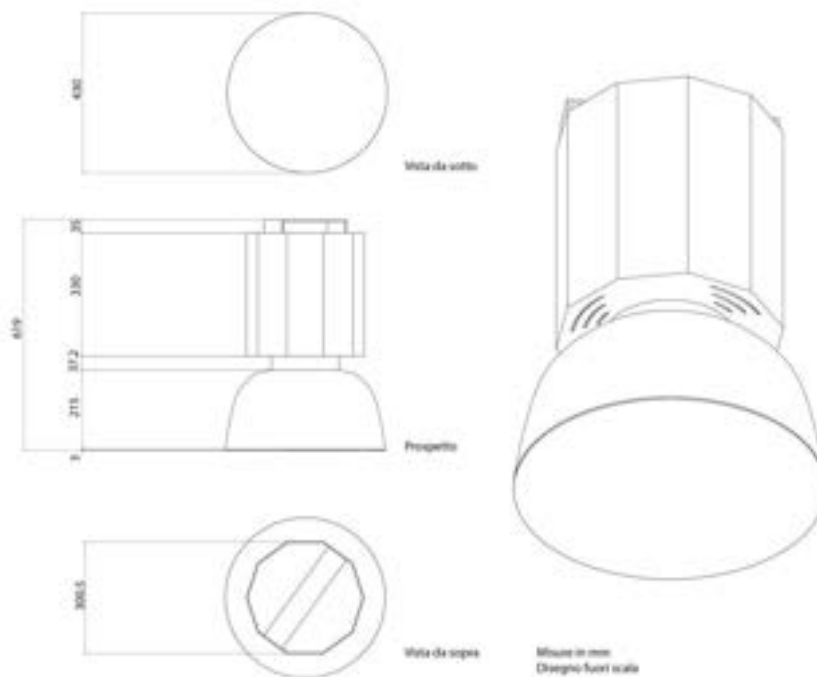
Le dimensioni del sistema ottico ottenuto sono approssimativamente di 430 mm per il diametro di uscita e un’altezza di 250 mm, in linea con quanto previsto nella fotometria di riferimento in termini di area luminosa dell’apparecchio.



**Figura 39 Distribuzione fotometrica simulata dell’ottica HumbleBee**

Per quanto riguarda le dimensioni dell’intero apparecchio, si stima che l’altezza complessiva (compreso il gancio di sospensione) sia all’incirca pari a 710 mm.

Gli ingombri di massima dell’apparecchio completo, sono riportati alla Figura 40: l’apparecchio assume proporzioni molto simili rispetto a quelle di un prodotto equipaggiato con lampada a scarica.



**Figura 40 Tavola ingombri di massima apparecchio HumbleBee per illuminazione industriale (illuminazione generale)**

Il rendimento del sistema ottico secondario risulta pari a circa 81%, molto vicino al valore teorico previsto per la fotometria di riferimento, fissato a 85%<sup>23</sup>.

L'efficienza del sistema complessivo risulta pari a  $22367 \cdot 0.81 / 203 = 89.24$  lm/W, considerando il valore della potenza elettrica assorbita, pari a 203 W, come si desume dal precedente report ENEA.

Migliori performance sarebbero state possibili se la progettazione fosse avvenuta in modo integrato (camera di miscelazione e dissipatore e ottica secondaria), considerando soluzioni alternative, quali ad esempio la creazione di sorgenti multiple di minor diametro e flusso luminoso, accoppiate con ottiche con migliore controllo del flusso luminoso, date le ridotte dimensioni delle sorgenti. L'adozione di sorgenti multiple non sarebbe stata problematica in quanto l'elevata altezza di installazione del prodotto (tipica dell'applicazione industriale) avrebbe consentito una miscelazione ottimale delle emissioni luminose di ciascuna sorgente.

I risultati impiantistici ottenuti per un piano di lavoro a 100 cm del pavimento sono riportati alla Figura 41, dove si osserva un valore medio di illuminamento superiore a 300 lux e un valore di uniformità  $E_{min}/E_{med} = 0.76$ .

Per quanto riguarda i valori dell'indice di abbagliamento UGR, i risultati per un ambiente privo di arredi e posizionando degli osservatori nelle stesse posizioni considerate nei casi precedenti, sono quelli riportati alla Figura 42: si osserva che per tutte le posizioni, risulta rispettato il limite di 19 punti, come da specifica di progetto.

<sup>23</sup> Non si conoscono i dettagli costruttivi della camera di miscelazione; gli unici dati disponibili sono il valore di efficienza luminosa descritti dal report ENEA, pari a 110 lm/W



Scala 1 : 129

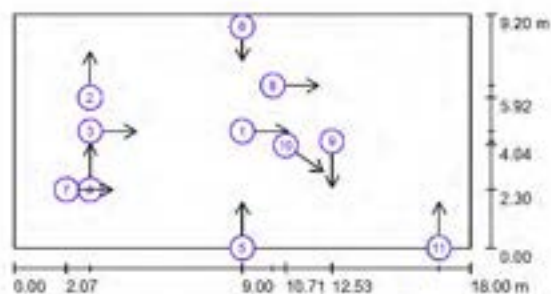
Posizione: (9.000 m, 4.600 m, 1.000 m)  
 Dimensioni: (17.476 m, 8.800 m)  
 Rotazione: (0.0°, 0.0°, 0.0°)  
 Tipo: Normale, Reticolo: 15 x 10 Punti

**Panoramica risultati**

No.	Tipo	$E_m$ [lx]	$E_{min}$ [lx]	$E_{max}$ [lx]	$E_{min} / E_m$	$E_{min} / E_{max}$	$E_{h,m} / E_m$	H [m]	Fotocamera
1	perpendicolare	465	355	607	0.76	0.58	/	0.000	/

$E_{h,m} / E_m$  = Rapporto tra illuminamento centrale orizzontale e verticale, H = Altezza di misurazione

Figura 41 Riepilogo valori di illuminamento e di uniformità per il piano di lavoro a 100 cm dal pavimento (distribuzione fotometrica simulata)



Scala 1 : 200

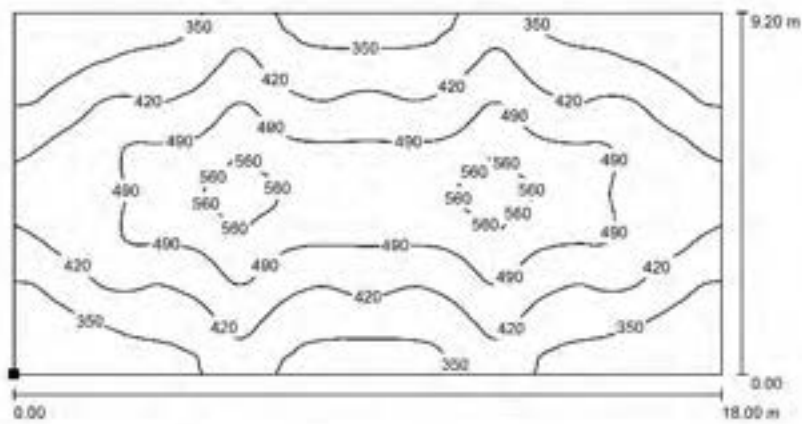
**Elenco punti di calcolo UGR**

No.	Denominazione	Posizione [m]			Linea di mira [°]	Valore
		X	Y	Z		
1	Punto di calcolo UGR 1	9.000	4.600	1.750	0.0	<10
2	Punto di calcolo UGR 1	3.000	5.924	1.750	90.0	/
3	Punto di calcolo UGR 1	3.013	4.600	1.750	0.0	10
4	Punto di calcolo UGR 1	3.000	2.300	1.750	89.8	19
5	Punto di calcolo UGR 1	9.000	0.000	1.750	90.0	<10
6	Punto di calcolo UGR 1	9.000	9.200	1.750	-90.0	<10
7	Punto di calcolo UGR 1	2.066	2.300	1.750	0.0	<10
8	Punto di calcolo UGR 1	10.200	6.400	1.750	0.0	12
9	Punto di calcolo UGR 1	12.532	4.200	1.750	-90.0	/
10	Punto di calcolo UGR 1	10.714	4.041	1.750	-35.0	14
11	Punto di calcolo UGR 1	16.757	0.000	1.750	90.0	<10

Figura 42 Valori UGR ottenuti con la distribuzione fotometrica simulata, relativi ad un ambiente privo di arredi

Infine, per quanto riguarda i valori di illuminamento sul pavimento, i risultati sono quelli riportati alla Figura 43, con un valore medio di 425 lux e un valore di uniformità  $E_{min}/E_{medio}=0.662$ : risultati superano con margine i valori minimi previsti dalle specifiche di progetto.





Posizione della superficie nel locale:  
Punto contrassegnato: (0.000 m, 0.000 m,  
0.000 m)



Valori in Lux, Scala 1 : 129

Reticolo: 128 x 128 Punti

$E_m$  [lx]  
425

$E_{min}$  [lx]  
281

$E_{max}$  [lx]  
582

$E_{min} / E_m$   
0.662

$E_{min} / E_{max}$   
0.483

**Figura 43 Riepilogo valori di illuminamento e di uniformità sul pavimento (distribuzione fotometrica simulata)**

L'aspetto complessivo del prodotto è mostrato alla Figura 44, attraverso una serie di rendering dell'apparecchio, osservato da diverse angolazioni.



Figura 44 Aspetto complessivo del prodotto HumbleBee (con riflettore)

## 4 Capitolo B.2: Studio delle problematiche dell'interfaccia di controllo del sistema al fine di ottenere un sistema efficace ed intuitivo, anche per personale non-esperto

### 4.1 *Overview: la luce LED ed i suoi sviluppi futuri*

Nonostante ancora ai suoi primi passi nella penetrazione completa del mercato nel settore illuminazione, il fenomeno della “LEDificazione” del lighting design è in costante aumento e sembra inarrestabile. Se per James Brodrick del Dipartimento di Energia Americano (DOE)<sup>10</sup>, l'efficienza energetica è stato e sarà uno dei maggiori e più importanti fattori da tenere in considerazione quando si parla di luce allo stato solido, molteplici sono i valori positivi che determinano la spinta al continuo progresso tecnologico delle sorgenti LED. Se da un lato la spinta tecnologica verso l'illuminazione a LED è l'efficienza energetica (si stima che nel 2020 si arriverà agli ipotizzati 258lm/w)<sup>11</sup>, dall'altro i LED promettono nuove funzionalità impensabili con le sorgenti tradizionali. Lo Smart Lighting ovvero l'implementazione di sistemi luminosi con capacità di controllo, comunicazione e interconnessione di dati configura nuove modalità di interagire con le performance luminose e nuovi apparecchi di illuminazione equipaggiati di servizi ulteriori.

Secondo Brad Koerner, direttore dell'Experience Design Centre presso Philips Lighting<sup>12</sup>, la tecnologia LED sarà il mezzo che faciliterà un cambiamento epocale contemporaneamente nei settori tecnologico, architettonico e costruttivo. Nella sua presentazione “Reaching the next evolution in lighting” durante la conferenza “Strategies in Light 2013”<sup>13</sup> descrive uno scenario in cui la progettazione della luce nel prossimo futuro sarà perfettamente standardizzata e modulare al fine di poter essere installata all'interno delle architetture come un vero e proprio materiale da costruzione. Questa visione di modularità, integrazione e customizzazione del sistema di illuminazione prevede anche una notevole capacità di adattamento dei singoli elementi di illuminazione, tutti equipaggiati di una propria intelligenza, in grado di declinarsi in diverse funzionalità in base alle necessità di illuminazione sia in spazi interni sia esterni.

Questo scenario futuro sarà facilitato dagli avanzamenti in diversi settori tecnologici ormai penetrati nel mondo dell'illuminazione, tra cui in particolare, la capacità di gestione e scambio delle informazioni, la connessione del mondo digitale con quello analogico attraverso l'Internet delle Cose (Internet of Things), la miniaturizzazione e diffusione dei componenti integrabili all'interno dei moduli come sensori e controlli intelligenti, cambierà profondamente la tendenza attuale che si limita all'integrazione dei LED in sistemi tradizionali mediante retrofit.

Diversamente, essendo un semiconduttore digitale, il LED oltre alla luce può veicolare ulteriori servizi e definire nuove forme di interazione all'interno di nuovi ambienti intelligenti. Il lighting designer Rogier van der Heide di Philips durante la Conferenza Lighting Fixture Design 2014<sup>14</sup> descrive uno scenario futuro in cui l'illuminazione da commodity diventerà un servizio incontrando lo sviluppo del settore ICT. Gli apparecchi di illuminazione diventeranno hub di informazioni provenienti da altre fonti e saranno in grado di adattare la performance luminosa in base all'elaborazione di questi dati molteplici. Mano a mano che i sistemi di illuminazione diventano più intelligenti e connessi alla rete, le interfacce di controllo diventano più fluide ed abilitanti, i sensori meno costosi e le possibilità di innovazione nelle modalità di controllo della luce diventano evidenti.

### 4.2 *La luce LED come piattaforma cognitiva, sensibile, intelligente*

Gli apparecchi di illuminazione saranno potenzialmente in grado di avere un'anima digitale intelligente e funzioni cognitive attive, estremamente adattabili a diversi usi, attività e contesti. La luce potrà avere prestazioni che assolvono ad esigenze più funzionali in cui si esige estrema efficienza energetica oppure potrà modificarsi per esigenze estetiche e/o decorative.

Collegandosi alla rete internet, i nuovi apparecchi di luce acquisiranno un ruolo attivo, si renderanno riconoscibili, comunicheranno dati su se stessi e saranno in grado di accedere ed elaborare informazioni non correlate ma aggregate da parte di altri sistemi per mettere in scena strategie di illuminazione più dettagliatamente predittive e personalizzate. Nel corto e medio termine tali sistemi saranno in grado di ottimizzare e personalizzare le performance in relazione alla presenza, alle attività e ai comportamenti delle persone per ottimizzare l'utilizzo di energia e al contempo migliorare il comfort.

*"Using light to respond over time to people's presence, to their activities, to their preferences and desires is something that was not really possible previously, certainly not on any large scale."* (Susanne Seitinger City Innovations Manager, Philips Color Kinetics)

In un settore lavorativo e/o industriale, l'illuminazione potrà essere pensata in maniera flessibile e personalizzabile, mediante sistemi autonomi o automatici che possano adattare l'illuminazione per aumentare la produttività durante le attività di lavoro, modificare la distribuzione spettrale e spaziale per migliorare il benessere, la sicurezza e la salute degli utenti lavoratori. In futuro, la luce potrà supportare con particolari performance chi si sente stanco, potrà calmare nei momenti di particolare stress e potrà essere in grado di cambiare i ritmi quotidiani. La relazione tra uomo e illuminazione sarà da immaginare e riprogettare tramite nuovi livelli di interazione, nuove applicazioni e possibili utilizzi si svilupperanno in maniera esponenziale come quanto è accaduto per gli Smart Phones.

### 4.3 User Experience

Nello sviluppo tecnologico di prodotti, sistemi e ambienti luminosi sempre più complessi come quelli che si configurano sotto la generale dicitura di Smart Lighting, è fondamentale che il ruolo dell'utente rimanga centrale nel progetto. Accanto alla ormai consolidata soddisfazione dei requisiti funzionali come sicurezza e prestazioni luminose e/o al raggiungimento dell'eccellenza tecnica in fase di fabbricazione, emerge la necessità di una progettazione centrata sull'utente, che sposta l'attenzione sui bisogni e sull'esperienza dell'individuo, per cui si intende non soltanto la soddisfazione del comfort visivo ma anche la valutazione dell'atmosfera luminosa dell'ambiente e anche la relazione di gestione, controllo e personalizzazione con l'oggetto luminoso e la performance luminosa.

Lo studio dell'esperienza utente rispetto all'illuminazione consiste nel comprendere come questa possa soddisfare le esigenze emotive degli utenti e le loro esperienze nell'uso di prodotti, sistemi e ambienti luminosi. In particolare, una ricerca approfondita risulta necessaria per definire quali requisiti siano utili all'esperienza luminosa in termini della gestione della sua interfaccia in relazione a diversi utenti e rispetto ai parametri di **motivazione** (esempio: l'utente è motivato ad interagire con lo strumento luminoso, secondo quali rituali, a quale scopo) **apprendimento** (esempio: l'utente comprende direttamente le modalità di interazione con l'elemento luminoso o necessita di un training iniziale. L'interfaccia risulta facilmente riconoscibile e culturalmente accettata?) **destrezza** (esempio: l'utente è in grado di interfacciarsi e manipolare l'oggetto e la performance luminosa con accuratezza e agilità, in maniera rapida e che non richiede particolari sforzi cognitivi e/o fisici. Quanti e quali errori commette? Quali difficoltà incontra?) Questo ambito di ricerca è particolarmente transdisciplinare perché mette insieme competenze di natura più tecnica (ad esempio: ICT, ingegneria informatica, ingegneria delle telecomunicazioni) e competenze di natura più umanistica (ad esempio: psicologia e psicologia ambientale) all'interno del progetto di natura applicativa (ad esempio: product design, interaction lighting, lighting design). È fondamentale comprendere quale sia l'esperienza utente di nuovi sistemi di interfaccia mediante metriche e modelli per la valutazione della risposta dell'utente e strumenti e approcci per la prototipazione e test interfacce utente.

### 4.4 Analisi dei casi studio

#### 4.4.1 Criteri di selezione dei casi studio e obiettivi

L'emergente fenomeno delle nuove modalità di interazione con gli apparecchi di illuminazione è stato investigato attraverso la selezione e l'analisi dei casi studio con l'obiettivo di effettuare approfondimenti

tematici orientati alla progettazione con lo scopo di delineare un primo quadro teorico descrittivo in questo settore di ricerca. Lo studio vuole rispondere alle seguenti domande:

- Cosa si intende con interazione con l'illuminazione?
- Che tipo di coinvolgimento può determinare l'interazione con l'illuminazione?
- Quali sensi e modalità di relazione sono attivati nell'interazione con l'illuminazione?

L'analisi è stata condotta con lo scopo di capire come si stia evolvendo questo nuovo settore della progettazione dei prodotti di illuminazione. I risultati di questo studio comprendono:

- Un'analisi approfondita dei singoli casi studio attraverso delle schede dedicate (allegato A)
- Una serie di grafici riassuntivi che rappresentano le categorie e le tematiche approfondite;
- Un'interpretazione delle categorie e dei trend emergenti.

#### 4.4.2 Il processo di ricerca

Negli ultimi anni sono stati sviluppati un numero sempre maggiore di prodotti di illuminazione (sia prototipi di ricerca che prodotti realmente disponibili sul mercato) in cui l'interazione compare come una delle caratteristiche principali nell'uso degli stessi: dal semplice interruttore che accende e spegne, il prodotto di illuminazione sta lentamente acquisendo funzioni più complesse che determinano nuove modalità di relazione con lo stesso. Se nel campo dell'interaction design, si è già molto approfondito sui modelli di interfaccia uomo-macchina, l'interazione nel settore del lighting design e soprattutto nei sistemi di controllo risulta un argomento ancora inesplorato. Gli studi e le ricerche sull'argomento sono limitati e preliminari, al contempo risulta un ambito molto interessante per le possibilità di intervento. L'analisi dei casi-studio è stata sviluppata in quattro fasi principali: selezione, descrizione, classificazione dei casi studio con un'analisi dei risultati finale e lo sviluppo di linee guida.

#### Selezione e descrizione dei casi studio

La selezione di progetti, prototipi e prodotti sviluppati (33 casi) negli ultimi anni è stata effettuata sulla base della novità, originalità e preminenza rappresentata nel settore. L'analisi è stata elaborata attraverso un approccio di ricerca secondaria. Le fonti delle informazioni sono state:

- Progetti di apparecchi di illuminazione che hanno vinto specifici premi di design (ad esempio IF award)
- Prodotti esposti su siti e blog di design e lighting design internazionali (Archilight, Luxemozione, The Enlighter Magazine, Mondoarch)
- Riviste di luce e design internazionali (PLD magazine, LUX magazine)
- Centri, Laboratori di ricerca di università di design e interaction design (TU/Eindhoven, MIT)

La descrizione dei casi studio specifici con approfondimenti è stata raccolta all'interno di schede progetto (Allegato A).

#### Classificazione dei casi studio

Il più importante obiettivo della fase di analisi è stato comprendere le categorie, in particolare:

- Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:
  - GUI, interazione utente attraverso un supporto grafico
  - SUI, interazione utente attraverso un supporto superficiale
  - TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale
  - Interazione attraverso un telecomando
  - Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)
  - Interazione vocale (audio)
- Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:
  - passivo | attivo
  - autonomo | manuale
  - naturale | astratto | metaforico
- Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI
- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI e SUI
- Gestualità nell'interazione spaziale
- Modello di comunicazione:
  - Indirizzo: come avviene la comunicazione con il sistema
  - Attenzione: stabilire se il sistema sta rispondendo all'interazione
  - Azione: definire che cosa sta facendo il sistema
  - Alienamento: monitoraggio del responso del sistema
  - Incidente: evitare e recuperare gli errori

### **Risultati dell'analisi e sviluppo di ipotesi e linee guida progettuali**

Durante la fase di classificazione, è stata effettuata un'analisi comparativa per rappresentare le connessioni e i trend rispetto al fenomeno mediante una più approfondita descrizione e discussione dei risultati. Lo scopo finale è stato quello di derivare degli approfondimenti progettuali sotto forma di linee guida sia in termini di migliori pratiche, sia nella comprensione della relazione e interfaccia con le persone a fini progettuali.

## **4.5 Interagire con l'illuminazione**

Il campo di investigazione che riguarda l'interazione dell'uomo con i prodotti e sistemi di illuminazione è un tema di ricerca molto giovane e di particolare rilevanza per i possibili sviluppi futuri della tecnologia LED. Le precedenti applicazioni e gli studi disponibili nello specifico settore dell'interazione con la luce sono limitati e focalizzati su alcune specifiche applicazioni e contesti d'uso; al tempo stesso numerose aziende di illuminazione, oggi, stanno sperimentando diverse modalità di interfaccia ed interazione con i loro prodotti di illuminazione. L'obiettivo di questo report preliminare è definire le potenziali nuove modalità di controllo dell'illuminazione, attraverso una serie di casi studio e di ricerca (ad esempio prototipi di studio testati in laboratori, gruppi di ricerca e università) che possano essere considerati le più interessanti o innovative pratiche al fine di identificare le tendenze e i paradigmi di interazione per il controllo dell'illuminazione. L'interazione con la luce, intesa come prodotto, apparecchio o ambiente, si focalizza sui seguenti temi:

- Progettazione del prodotto: ergonomia cognitiva, mapping, semiotica e affordance
- Paradigmi di interazione che soddisfino le esigenze emotive degli utenti
- Progettazione e tecnologie di sistemi responsivi

In termini di user-centered design di un prodotto o sistema di illuminazione, è inoltre importante investigare:

- quali individui controllano il sistema di illuminazione (chi),
- in quali contesti questo avviene ovvero se in situazioni private o pubbliche (dove),
- quali elementi, parametri e caratteristiche della luce e dell'ambiente luminoso vengono controllati (che cosa),
- quali motivi portano un individuo a controllare la luce (perché).

I sistemi di controllo dell'illuminazione prospettano nuovi scenari applicativi e, di conseguenza, delineano nuovi possibili comportamenti, gestualità, riti. Le difficoltà progettuali risiedono non solo a livello tecnologico, elemento in continua evoluzione con le sue difficoltà e limiti intrinseci, ma anche e soprattutto nella definizione di nuovi oggetti/sistemi/esperienze basati sulle modalità di relazione tra utenti e sistema di illuminazione, ovvero nella definizione di nuovi scenari causa-effetto finalizzati a creare ambienti più intelligenti in cui l'esperienza luminosa possa influenzare in maniera positiva la qualità della vita dell'individuo.

I nuovi sistemi di illuminazione e ambienti luminosi possono essere concepiti e progettati per stabilire nuove narrazioni di utilizzo, incentivando determinate azioni e attività specifiche e/o permettendo di trasformare l'illuminazione in base a specifiche esigenze. L'interazione, ovvero lo spazio di comunicazione e azione del sistema di illuminazione deve essere percepita in termini di semplicità, naturalezza, intuitività, novità. In questo senso, è necessario considerare fattori come cultura, personalità, esperienza in modo da creare dei principi individuali ma anche universali applicabili a più prodotti/sistemi/servizi.

Il modo in cui è progettata l'interazione con l'illuminazione determina la **struttura, i limiti e le opzioni** con cui ci si può e/o ci si deve comportare per avere un feedback luminoso. Un individuo può essere spinto ad interagire con l'illuminazione per motivi funzionali per migliorare il proprio **benessere visivo** oppure per motivi inconsci ma altrettanto importanti come migliorare il proprio **benessere psicologico**. In entrambi i casi, il controllo attivo dell'illuminazione determina un rinnovato e importante senso di spazialità e di **personalizzazione** dell'atmosfera luminosa del proprio spazio con ricadute anche dal punto di vista di responsabilità e gestione corretta delle risorse.

*"Systems that can be more individually responsive could blend both the natural and electric light and offer the most interesting aspect of sustainable lighting."* (Teal Brogden - Senior Principal - Horton Lees Brogden Lighting Design)

Infine, l'interazione con l'illuminazione e con l'ambiente fisico, il modo in cui sono configurate e sono disponibili i livelli di interazione tra gli elementi da parte dell'uomo e la logica con cui si può interagire, comportarsi e manipolare la luce determinano non solo le azioni, i movimenti degli individui ma possono anche influenzare le interazioni sociali, attivando comportamenti che invitano al contatto e alla discussione.

*"I think in social events it's very interesting to use interactive light. Recognition of presence or of specific presence of people, breaks social barriers, rather than confirming them."* (Winka Dubbledam, Principal. Archi-Tectonics)

*"If you make something that's interactive or reactive, you encourage people to walk up and spend time there."* (Brett Renfer Senior Technologist. Rockwell Group)

#### 4.6 Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione

Nelle discipline tecniche, interfaccia assume il significato di dispositivo fisico o virtuale che consente la comunicazione fra due o più entità di tipo diverso aventi un proprio protocollo di comunicazione. In generale, l'interfaccia utente non è necessariamente legata ad un sistema informatico, ma è qualsiasi cosa (punto, oggetto, area, superficie) che consente ad un individuo di poter gestire le funzionalità di un sistema. Più un'interfaccia svolge bene il proprio compito di interconnessione tra entità e meno essa è percepibile; l'immediatezza e la trasparenza del proprio uso la rendono invisibile. L'elemento caratterizzante di un oggetto, che porta l'utente a farne uso o a rifiutarlo, è proprio l'interazione con esso, in particolare il suo livello di complessità. La valenza di un oggetto sotto il profilo dell'usabilità è data dalla capacità di intrattenere un dialogo piacevole con l'utente, di intuire e rispondere alle sue esigenze, di agire e reagire. Bill Verplank<sup>15</sup> descrive come le persone si approcciano ad un'interfaccia utente. Un utente che si pone di fronte ad un'interfaccia riceve dei feedback in base alle azioni che egli compie e interpreta questi feedback come fossero risposte alle proprie domande: Cosa devo fare? Cosa sento? Cosa comprendo?. Sulla base di questo, ha implementato insieme a Bill Moggridge<sup>16</sup> il modello di un'interfaccia utente che richiede due componenti fondamentali: il controllo (ovvero l'azione di interazione) e la sua rappresentazione esterna (ovvero il feedback). L'utente produce un INPUT attraverso le sue azioni di manipolazione e controllo dell'informazione<sup>17</sup>. Il controllo è quindi il mezzo attraverso il quale le persone possono gestire l'accesso alle informazioni digitali e luminose e dunque poterle manipolare. A tale azione deve corrispondere un'elaborazione dell'informazione digitale come OUTPUT che avviene sia all'interno del sistema controllato sia a livello di un feedback con effetti rappresentabili e percepibili dai sensi umani. Il feedback è

quell'informazione di ritorno che ci dice quali risultati abbiamo ottenuto con la nostra azione. La rappresentazione esterna è il mezzo mediante il quale le persone riescono a comprendere e percepire il risultato di un'azione svolta e/o percepita dal sistema. Se l'informazione di ritorno non viene fornita c'è il rischio che l'utente si senta frustrato e pensi o a un proprio errore o ad un problema del sistema.

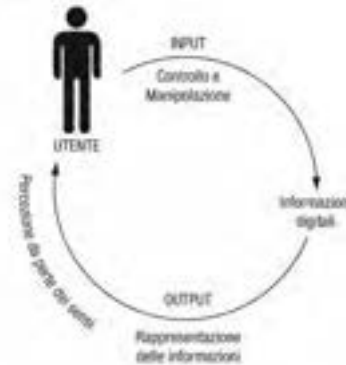


Figura 45 Rappresentazione della relazione tra utente e interfaccia

L'interazione si svolge su due livelli:

- la prima avviene a livello fisico ed è legata al rapporto tra forma e funzione. È la modalità con cui elementi quali maniglie, manopole, bottoni identificano e comunicano la propria funzione (affordance).
- Il secondo livello di interazione coinvolge anche la sfera mentale dell'utente. In questo caso la relazione tra forma e funzione non è immediatamente intelligibile, ma viene comunicata attraverso metafore rispondenti ai modelli insiti nel sistema cognitivo dell'utente. Solo la corretta interpretazione del significato comunicato attraverso il "segno" consente lo svolgimento dell'interazione.

Il parametro fondamentale sulla quale si basa la progettazione e la successiva valutazione delle interfacce uomo-macchina, prende il nome di **usabilità**<sup>18</sup>. Il termine è generalmente utilizzato nel settore degli studi sull'interazione uomo-computer e nelle scienze informatiche, in riferimento alla chiarezza ed alla componente estetica all'interno della progettazione di software o di un sito web, ma il concetto è perfettamente applicabile anche al design di oggetti meccanici o luminosi. Il problema dell'usabilità si pone quando il modello del progettista (ovvero le idee di questi sul funzionamento del prodotto, che trasferisce al design del prodotto stesso) non coincide con il modello dell'utente finale (ovvero l'idea che l'utente concepisce del prodotto e del suo funzionamento).

Lo standard ISO 9241-11<sup>19</sup> definisce l'usabilità come *"l'efficacia, l'efficienza e la soddisfazione con le quali determinati utenti raggiungono determinati obiettivi in determinati contesti"* ossia il grado di facilità e soddisfazione con cui l'interazione uomo-strumento si compie. L'efficacia è *"l'accuratezza e la completezza con cui determinati utenti possono raggiungere determinati obiettivi in determinati contesti"*; mentre l'efficienza deriva dalle *"risorse utilizzate per raggiungere gli obiettivi con accuratezza e completezza"*; la soddisfazione è un parametro più soggettivo e difficile da quantificare, definito come *"l'utilità percepita dell'intero sistema da parte dei propri utenti, e il livello di comfort avvertito dall'utente nell'utilizzare un determinato prodotto"*.

Un modello di analisi, quantitativa e qualitativa, delle attività e delle risorse dell'utente coinvolte dall'interazione è l'Elemental Resource Model (ERM) proposto da Kondraske nel 1995<sup>20</sup>. Nell'ERM si quantificano le risorse dell'utente in termini di requisiti ed abilità necessari per il raggiungimento dell'obiettivo e competenze. Le risorse sono definite come le capacità dell'utente di svolgere una funzione elementare; le competenze sono quantificate, invece, in termini di conoscenza ed esperienza. Solo considerando insieme le risorse possedute dall'utente e quelle necessariamente richieste dall'interazione con il sistema, è possibile raggiungere un buon compresso.



Attraverso l'ERM è possibile anche valutare l'usabilità. In accordo con tale approccio, infatti, un'interfaccia è minimamente usabile quando l'utente deve impiegare tutte le proprie abilità e competenze per raggiungere l'obiettivo prefissato. Questa definizione di usabilità non si riferisce, quindi, solo alla progettazione dell'interfaccia, ma coinvolge l'interrelazione tra gli obiettivi che si possono raggiungere, data una certa interfaccia, e le risorse spese dall'utente per poterli raggiungere; essa implica, tra l'altro, che per ogni utente, a seconda delle sue abilità, ci sarà un diverso livello di minima usabilità per la stessa interfaccia. L'usabilità ottimale, viceversa, minimizza le risorse richieste all'utente attraverso l'opportuna organizzazione delle azioni e delle informazioni.

L'ERM può essere utile per estrarre alcune linee-guida per ottimizzare l'usabilità, di validità del tutto generale, basate anche su evidenze che emergono dall'esperienza<sup>21</sup>:

- naturalzza nell'interazione: le azioni coinvolte nell'interazione dovrebbero richiamare le gestualità naturali con cui l'utente ha familiarità, ispirate dalla sua quotidianità. Dal punto di vista strettamente fisico questo significa utilizzo degli standard antropometrici, nella definizione degli spazi, delle dimensioni e della configurazione dei componenti congruenza tra le caratteristiche dei controlli e dei display (forza richiesta, sensibilità, luminosità, intensità, dimensione delle informazioni visualizzate) e le capacità fisiche dell'utente.  
Dal punto di vista cognitivo, invece, la naturalzza dell'interazione implica che il modello dell'interazione progettato nell'interfaccia, sia il più possibile aderente al livello di conoscenza ed esperienza dell'utente. Particolare attenzione, quindi, deve essere dedicata alla definizione delle abilità/limitazioni percettive e cognitive dell'utente finale.
- Semplicità: dal punto di vista delle componenti fisiche dell'interfaccia, la semplicità riduce il numero dei passi necessari alla selezione ed all'effettuazione delle operazioni, così come i requisiti a livello di precisione del movimento. Applicando il principio di semplicità, è possibile ridurre il carico cognitivo, mnemonico e percettivo richiesto all'utente.
- Consistenza: si riferisce al fatto che la sintassi (linguaggio, campi di input, colori, etc..) e la semantica (comportamenti associati agli oggetti) del dialogo devono essere uniformi e coerenti all'interno di tutto il sistema. La consistenza permette all'utente di trasferire agevolmente la conoscenza da una funzionalità all'altra, aumenta la predicibilità delle azioni e dei comportamenti del sistema e ne favorisce l'apprendimento. La consistenza tra interfaccia e modello dell'utente è ottenibile attraverso un'opportuna organizzazione delle informazioni, dei flussi di operazioni, delle rappresentazioni degli oggetti, delle azioni e delle procedure.
- Robustezza: identifica la fault-tolerance del sistema, ossia la capacità di rispondere efficacemente ad eventuali errori compiuti dall'utente causa inesperienza, con evidenti benefici dal punto di vista della velocità di svolgimento delle operazioni. In un'interfaccia "robusta" l'errore dovrebbe poter essere atteso, in modo tale da consentire all'utente di navigare nel sistema e poter tornare indietro in qualunque fase del flusso di operazioni. Aumentare la robustezza riduce il carico di risorse funzionali domandate all'utente.

In base ai casi studio analizzati, esistono diverse categorie di interfaccia<sup>22</sup> per il controllo dell'illuminazione:

- Graphical User Interface o GUI con un controllo grafico,
- Surface User Interface o SUI con un controllo mediato attraverso touch-screen e display
- Tangible User Interface o TUI con un controllo fisico,
- Interazione Spaziale con un controllo gestuale nello spazio circostante
- Attivazione vocale e/o sonora (sonified I/O)
- Controllo tramite Telecomando

In particolare, verranno analizzate le prime quattro categorie nei successivi paragrafi.

#### 4.6.1 Graphic User Interface (GUI)

L'interfaccia è rappresentata da componenti non tangibili come pixel e rappresentazioni digitali che vengono attivate mediante strumenti come il mouse o la tastiera.



Figura 46 Esempi di input di un interfaccia GUI

L'interfaccia GUI consente di utilizzare gli stessi strumenti per controllare diverse interfacce; si tratta quindi di una modalità di interazione flessibile ed adattabile che può essere riprogrammata per diversi scopi e funzioni. Tipicamente, in una GUI, i controlli fisici e tangibili sono utilizzati per interagire e manipolare informazioni digitali attraverso elementi intangibili come icone, menù, grafici. Tali sistemi vengono utilizzati nel settore dell'illuminazione tramite software dedicati.

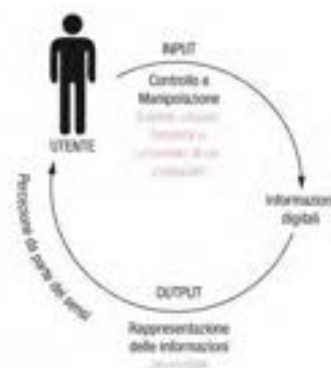


Figura 47 Modello di interazione con interfacce GUI

#### 4.6.2 Surface User Interface (SUI)

L'interfaccia consiste in una superficie auto-illuminata (es. LCD) o proiettata su una superficie orizzontale o verticale che sia anche interattiva perché in grado di controllare le informazioni e i feedback attraverso un sistema di controllo sulla stessa superficie fisica. Le interfacce SUI sono utilizzate sia in piccoli strumenti personali portatili come smart phone sia su superfici interattive di uso pubblico. In particolare, si usano nella dimensione pubblica laddove i mouse oppure le tastiere separate non siano particolarmente convenienti. Le interfacce SUI più comunemente utilizzate (es. ATM) sono molto semplici e utilizzano la tecnologia dei touch-screen resistivi con interfacce costituite da semplici pulsanti.

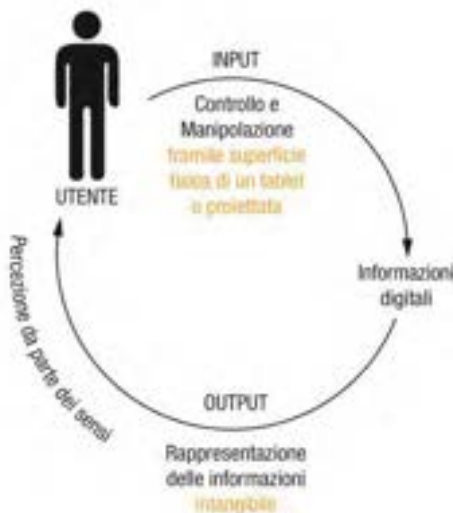


Figura 48 Modello di interazione con interfacce SUI

L'attuale generazione di interfacce SUI è basata sull'utilizzo di display LCD integrati all'interno di oggetti o complementi di arredo in maniera ormai ubiqua ed integrata tanto da determinare una sorta di invisibilità di azione.

La grandezza del display determina i benefici sociali che l'interfaccia SUI è in grado di supportare: le superfici verticali o orizzontali permettono l'interazione e la collaborazione faccia a faccia anche tra più persone e si distinguono in display "front-projected"<sup>24</sup>, "rear-projected"<sup>25</sup> e "self-illuminated".

Il controllo SUI su dispositivi personali come smart phone avviene mediante l'installazione di un applicazione sul proprio device e una comunicazione con il Sistema di illuminazione, generalmente tramite Bluetooth, Zigbee e WiFi passando attraverso una centralina di controllo (Smart Hub). Questo sistema consente una facile interazione con l'illuminazione ovunque ci si trovi e da parte di diversi utenti contemporaneamente.

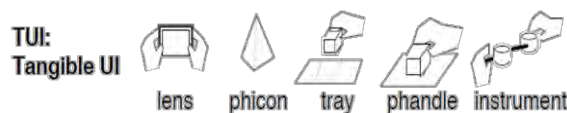
Il controllo SUI può anche essere fisicamente montato sulle pareti della stanza, sotto forma di interfaccia fissa, in maniera tale che possa essere gestito anche in assenza di smart phone, capace di gestire diverse informazioni in loco (ovvero non può essere spostato in altri spazi della casa. Tale unità di controllo può operare il sistema di illuminazione ma spesso integra funzioni diverse più complesse come il riscaldamento e il raffrescamento e gestisce le telecamere di sicurezza.



**Figura 49 Throne, esempio di interfaccia interattiva su supporto tablet (analizzato nelle schede dei casi studio)**

#### 4.6.3 Tangibile User Interface (TUI)

Secondo la definizione<sup>23</sup> più comunemente condivisa, le interfacce tangibili (TUI) sono sistemi che utilizzano artefatti fisici per la rappresentazione e il controllo delle informazioni digitali. La caratteristica centrale è l'integrazione tra controllo e rappresentazione all'interno di un oggetto fisico (augmented object) che sottende associazioni mentali e attraverso il quale manipolare direttamente sia l'input che l'output.



**Figura 50 Esempi di interfacce di controllo di tipo TUI**

L'esperienza è basata su un'interazione con informazioni prettamente digitali attraverso l'ambiente fisico, ovvero mediante oggetti che possano essere toccati, afferrati e manipolati come ad esempio oggetti metaforici consueti e non. L'interfaccia di controllo viene rappresentata attraverso un oggetto fisico che contiene l'interazione tra l'essere umano e il sistema di illuminazione e ha una sua forma fisica, tangibile, tridimensionale, equipaggiata da una serie di sensori che si interfacciano da un lato al sistema sensoriale umano (tatto e cinestesia) e dall'altro al sistema luminoso inviando input come informazioni digitali. Si tratta di una tendenza opposta rispetto al paradigma dominante della SUI che riduce l'esperienza tattile e fisica del mondo ad una superficie<sup>24</sup>. La TUI rende fisicamente tangibile il controllo e spesso anche la rappresentazione esterna (feedback) che, nel caso dei sistemi di illuminazione, è soprattutto rappresentato da un cambiamento nel sistema di illuminazione stesso.

<sup>24</sup> un esempio è il Digital Desk in cui l'applicazione riconosce l'utente che preme dei pulsanti stampati su una superficie sensibile al tatto (attraverso sistemi capacitivi) oppure che usa un sistema di visione per determinare posizione dell'utente e feedback (tale sistema può soffrire dell'occlusione determinata dall'ombra proiettata dall'utente rispetto alla camera e al proiettore).

<sup>25</sup> nasce per eliminare il problema dell'occlusione, dal momento che il proiettore viene posto in posizione retrostante insieme ai sistemi di riconoscimento della posizione dell'individuo quali illuminanti infrarossi su un piano semi-trasparente di plastica acrilica coperto da un materiale chiamato Hologram

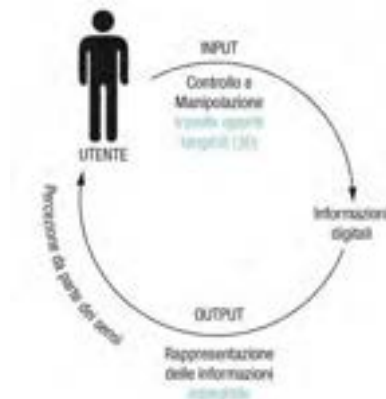


Figura 51 Modello di interazione tangibile TUI

La rappresentazione fisica e tangibile avviene mediante un meccanismo di controllo che consente al soggetto di afferrare, toccare, manipolare direttamente il controllo (mediante modificazione di forma, colore e movimentazioni) e al contempo di manipolare, modificare e controllare ciò che accade nel sistema digitale (feedback luminoso diretto) in modo che si crei un legame percettivo di causa – effetto ovvio e comprensibile da parte dell’utente.

Le TUI presentano alcune caratteristiche principali tra cui:

- La rappresentazione fisica del controllo è accoppiata ad una nascosta informazione digitale;
- La rappresentazione fisica del controllo include meccanismi per il controllo interattivo
- La rappresentazione fisica è percettivamente accoppiata ad un’attiva rappresentazione digitale
- Lo status dell’elemento tangibile deve comunicare direttamente l’aspetto dello status del sistema: l’input deve essere persistente
- In alcuni casi la rappresentazione digitale nel controllo fisico è necessaria per mediare informazioni dinamiche

In sostanza, le caratteristiche fondamentali concernono la necessità di dare una forma fisica comprensibile, semplice e facilmente riconducibile sia al feedback sia a gestualità note e/o cognitivamente assimilate alle informazioni in modo tale da permettere un’esperienza fluida, fruttuosa e cognitivamente ergonomica da parte degli utilizzatori. Il controllo e la rappresentazione convergono in un unico oggetto: dal semplice interruttore on/off di varie forme e dimensioni a cui siamo culturalmente (e nostalgicamente) abituati si passa a forme tangibili di interazione con l’illuminazione. Utilizzando sistemi tattili e tangibili per costruire l’interazione con informazioni digitali, si progettano non solo modi largamente più espressivi per interagire con il mondo e gli oggetti ma soprattutto si utilizzano gestualità e comportamenti che sono innati nelle capacità di ragionamento e nella conoscenza quotidiana degli individui. Una interazione tangibile si basa su:

- Materialità / tangibilità
- Rappresentazione fisica dei dati
- Incorporata in uno spazio reale all’interno di un oggetto aumentato di funzionalità



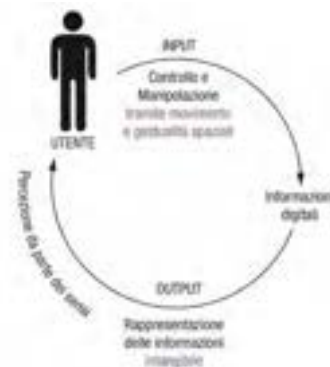
**Figura 52 Fonckel, un esempio di apparecchio di illuminazione con controllo TUI a bordo dello stesso (analizzato nelle schede dei casi studio)**

### Valori positivi dell'uso della TUI

Se oggi la maggior parte dei dati e informazioni digitali sono fruiti in maniera limitata attraverso un insieme di metafore come nel caso della GUI o mediante interfacce di superficie nel caso della SUI, senza conferire un'esperienza fisica e tangibile, la naturale esperienza umana si basa sulla relazione con oggetti reali e persone con cui si interagisce per mezzo di gesti e parole. L'interfaccia TUI recupera la metafora fisica e tangibile nel controllo delle informazioni digitali, aumentando l'esperienza dell'utente e reincorporando informazioni del mondo reale. Mentre i sistemi tradizionali hanno portato ad una percezione di estraniamento dal mondo reale, la TUI concettualmente riporta i dati digitali nel mondo reale<sup>25</sup>.

#### 4.6.4 Interazione Spaziale (gestural UI)

Questo tipo di interazione con oggetti di illuminazione e illuminazione ambientale dello spazio intero si riferisce al fatto che l'interazione sia integrata nello spazio stesso in cui accade l'interazione, ovvero attraverso il solo movimento nello spazio in cui l'illuminazione è installata. In questo senso il corpo umano diventa l'elemento di controllo che non solo interpreta e acquisisce dati dallo spazio ma è in grado di cambiarlo in base ai movimenti spaziali. Il controllo dell'illuminazione fa uso dell'intero corpo e dei movimenti che lo stesso è in grado di fare per ottenere un ambiente luminoso trasformabile in base alle proprie necessità.



**Figura 53 Modello di interazione gestuale**

Solitamente l'interazione spaziale e fisica da parte dell'utente si configura all'interno di un ambiente interamente o parzialmente intelligente (ambient intelligence) in cui la relazione avviene mediante gesti e movimenti nello spazio e in cui la vicinanza e il coinvolgimento corporeo dell'individuo (embodied interaction) sono predominanti.



**Figura 54 Area, prodotto di illuminazione che viene controllato mediante gesti e movimenti (analizzato nelle schede dei casi studio)**

## 4.7 Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione

### 4.7.1 Controllo passivo e controllo attivo

Nel caso di una interfaccia attiva, l'utente è direttamente coinvolto nell'interazione con l'oggetto che permette il controllo dell'illuminazione e dunque, più in generale, con l'informazione digitale tradotta successivamente in luce derivata dalla propria manipolazione o azione sull'elemento adibito al controllo. Il controllo attivo è collegato direttamente alla personalizzazione del proprio intorno, determinando e riconfermando l'importanza dell'utente nel modo in cui si relazione al fenomeno luminoso.

*"It's better to think about light installations that genuinely do something personalized, something that is unique to that person, that nobody else gets, even when they make the same movements/ touches." (Usman Haque Director. Haque Design + Research)*

Diversamente nel caso di un coinvolgimento e/o relazione passiva, l'utente non è chiamato direttamente ad interagire con il prodotto ma, il feedback è progettato in modo tale da inviare informazioni digitali, in maniera tangibile o intangibile su particolari status in modo tale che lo stesso utente agisca per ristabilire o modificare lo status stesso.

#### 4.7.2 Controllo automatizzato, manuale e ibrido



**Figura 55** Dicotomia tra i sistemi di controllo: automatizzato e manuale. Immagine derivata dall'articolo di van Essen H. e Offerman S. Exploring the Role of Autonomous System Behaviour in Lighting Control

Sempre più realizzabile attraverso sistemi di illuminazione a LED soprattutto grazie alla comunicazione wireless, il controllo manuale dell'illuminazione (flusso, distribuzione spettrale e distribuzione spaziale) che concede la possibilità di regolare la luce nella condizione preferita, è stato già ampiamente provato da numerosi studi<sup>26 27 28</sup> che sia in grado di migliorare la percezione della qualità della luce, l'umore e la soddisfazione ambientale. Alcuni studi hanno anche dimostrato che la personalizzazione dell'illuminazione determina vantaggi tanto più che le caratteristiche da modificare consentono ampie variazioni nell'ambito lavorativo e, uno studio in un contesto ufficio, ha messo in luce che il controllo manuale dell'illuminazione sul proprio spazio determina vantaggi anche dal punto di vista di risparmio energetico<sup>29</sup>. Al contempo un controllo completamente manuale, in situazioni più complesse in cui ci siano molti individui oppure le variabili che modificano l'illuminazione derivino anche da fattori esterni agli individui (come la luce naturale ad esempio) potrebbe determinare caos oppure risultati non completamente positivi.

Un controllo di tipo completamente automatizzato deriva dal solo funzionamento del sistema di illuminazione che prende decisioni autonome basandosi su informazioni rilevate dal contesto e non permette all'individuo di interfacciarsi attivamente con l'atmosfera luminosa che si modifica in base a parametri precedentemente impostati ed è informata da attuatori posizionati nello spazio (sensori di diversa tipologia). Un sistema di illuminazione automatizzato è estremamente utile in situazione in cui si debbano controllare più apparati di illuminazione contemporaneamente e diverse caratteristiche di illuminazione negli stessi. In aggiunta a ciò, un sistema automatizzato potrebbe selezionare una particolare illuminazione basandosi sull'esperienza o su preset stabiliti che possano migliorare l'atmosfera luminosa da un punto di vista, abilitando la luce con nuove potenzialità che gli individui spesso ignorano. Un sistema completamente automatizzato è più soggetto a determinare situazioni di luce indesiderate mal interpretando i segnali ricevuti dallo spazio e questo potrebbe causare un senso di diminuito controllo da parte degli utenti, nonché limitata accettazione.

Tra i due estremi, nel campo del controllo dell'illuminazione si cerca di trovare un punto di equilibrio tra un sistema di illuminazione che conservi alcuni comportamenti autonomi e automatizzati (prestabiliti) ma anche al contempo possa essere gestito anche manualmente dall'utente conservando un livello di personalizzazione e interazione<sup>30</sup>. Questo sistema ibrido consente di lasciare all'individuo la possibilità di interagire con e determinare il comportamento dell'illuminazione nei luoghi (dove), tempi (quando) e caratteristiche (come) desiderate ma, al contempo, permette anche la scelta di differenti preset (quali tra quelli prestabiliti) oppure demanda completamente al sistema di illuminazione un comportamento consono ma interrompibile e controllabile in qualsiasi momento. In questo senso è possibile creare dei sistemi estremamente intelligenti, sia capaci di imparare direttamente dal comportamento degli utenti, sia di creare nuovi possibili comportamenti non precedentemente prestabiliti ma che si adattino perfettamente sia al contesto specifico sia agli specifici utenti<sup>31</sup>.

#### 4.7.3 La rappresentazione del controllo: Mapping naturale, astratto e metaforico

Il controllo dell'interazione è la membrana di comunicazione con l'utente e il mondo digitale e necessita di una rappresentazione che sia ergonomica sia da un punto di vista fisico (maneggiabile, toccabile, afferrabile, etc) sia da un punto di vista cognitivo, ovvero in grado di rendersi comprensibile, leggibile e comunicare il proprio utilizzo legandosi al feedback che il controllo ha attivato. Oltre a questo, la rappresentazione dell'interfaccia può avere anche una sua propria espressività, comunicando in maniera astratta e metaforico/poetica. In modo in cui la rappresentazione del controllo è progettata influenza l'interazione stessa con l'oggetto: tramite l'interazione con gli oggetti e i sistemi di illuminazione, gli utenti

fanno esperienza del controllo e della possibilità di personalizzazione dell'illuminazione. In mapping tra la rappresentazione del controllo e il possibile feedback luminoso è importante.

Il mapping<sup>32</sup> indica la relazione tra due cose e comprende la scelta del tipo di interazione e interfaccia ovvero la modalità con cui viene manipolato/azionato il controllo, il suo posizionamento nello spazio e anche il modo in cui avviene la traduzione del controllo nel feedback. Esistono tre macro categorie di rappresentazione espressiva dei controlli:

- Un mapping naturale sfrutta analogie fisiche o modelli culturali precedentemente appresi e porta alla comprensione immediata; tale mapping sfrutta la rappresentazione concreta delle qualità distintive degli oggetti fisicamente manipolati nell'interazione. In tale rappresentazione vi è una chiara relazione, sia concettuale che fisica, con l'output: in questo modo la connessione mentale tra l'azione e il feedback è naturale e innata;
- Un mapping astratto indica la relazione fra due cose: attraverso rappresentazioni astratte che non hanno alcuna relazione diretta con l'output ma possono comunque essere associate ad esso per il loro grado di astrazione che è stato culturalmente compreso e accettato nel tempo. Tradizionalmente il sistema di astrazione più utilizzato è lo schermo con interfacce di mouse e tastiera che interagiscono con uno spazio astratto di un desktop in cui si manipolano gli elementi iconici rappresentati
- Un mapping metaforico sfrutta la rappresentazione allusiva, espressiva e poetica di un controllo attraverso gestualità che mimano concetti di controllo non direttamente relazionati al feedback in questione e mapping immaginifico non direttamente iconografico.

L'interazione deve essere intuitiva in tutti i casi, provvedendo a conferire un mapping leggibile per collegare l'azione e il suo effetto. In particolare essa deve:

- fornire un buon modello concettuale: attraverso l'esperienza ogni essere umano si crea dei modelli mentali che lo aiutano a comprendere e ad interagire con l'ambiente circostante. I modelli mentali devono essere chiari e coerenti, in modo tale che sia facile prevedere gli effetti delle proprie azioni sull'oggetto in questione.
- Rendere visibili le cose: osservando un oggetto l'utente deve essere in grado di conoscere lo stato dell'apparecchio e di vedere le azioni che ha la possibilità di compiere. I progettisti nella realizzazione di un oggetto spesso valorizzano principalmente il design, a discapito del principio di visibilità, così che parti fondamentali rimangono "nascoste" per non rovinare l'estetica.

Al mapping si ricollega il concetto di affordance<sup>33</sup> (detta anche "invito all'uso") che un oggetto dovrebbe possedere. Il termine, coniato da James J. Gibson (1979) per descrivere la relazione reciproca che esiste tra una animale e il suo ambiente. È stato successivamente applicato alla progettazione, per intendere la proprietà reale o percepita di un prodotto di suggerire il proprio funzionamento. Quando gli inviti all'uso (materiali, forme e colori) sono ben progettati, il prodotto diventa autoesplicativo, di conseguenza all'utente dovrebbe bastare guardare l'oggetto per capire quali operazioni può effettuare.

## 4.8 Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

### 4.8.1 Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI

I comandi diretti attivano una funzione senza il bisogno di nessun'altra operazione o procedura. I comandi indiretti sono quelli che richiedono altre operazioni per il loro funzionamento, come la lettura di una finestra di controllo.

L'usabilità di un comando può essere influenzata dalla sua forma, dalla facilità di riconoscimento, dal rapporto di riscontro, dalla resistenza e dalla posizione. Quando i comandi sono ben progettati sono più



precisi e i tempi di riscontro sono ridotti, così come sarà più semplice apprendere le procedure di controllo. Studiando l'interazione tra l'utente e il sistema il designer, quindi, cercherà di migliorare le funzionalità dell'apparecchio individuando, prima di tutto, le aree che renderebbero difficile il controllo di certe operazioni.

#### Individuazione della zona di controllo

Quanto più si differenzieranno i pulsanti tra loro, tanto più sarà facile individuarli e comprenderne le rispettive funzioni. La differenziazione dei comandi è fondamentale perché le persone impiegano molto più tempo ad individuare le caratteristiche quando questi sono simili rispetto a quando sono radicalmente diversi. Naturalmente, man mano che le dimensioni di un pulsante aumentano sarà più facile individuarlo, giacché occuperà più spazio. Le grandi dimensioni, infatti, indicano spesso un comando più importante. Un pulsante brillante e molto colorato spiccherà tra una gran varietà di pulsanti. Ma lo stesso pulsante posto tra altri colorati non si distinguerà allo stesso modo. Le disposizioni simmetriche sono più gradevoli esteticamente, ma possono risultare monotone. Quelle asimmetriche, invece, caratterizzate da uno sbilanciamento del peso visivo su un lato di un asse centrale, appaiono come più informali.

#### Posizione e raggruppamento

Una disposizione cieca comporta la ricerca di un pulsante se la persona ha gli occhi occupati. La ricerca in questo settore rivela che le disposizioni di comandi sono più precise quando i controlli sono posti direttamente di fronte alla persona.

La precisione della portata dei pulsanti diminuisce ulteriormente a seconda che siano disposti a destra o a sinistra. La gente tende ad essere più sensibile alle differenze di disposizione verticale che orizzontale. Quindi, la spaziatura tra i controlli dovrebbe essere maggiore in orizzontale. I pulsanti posti all'altezza delle spalle sono più facili da trovare rispetto a quelli al di sopra della testa. La posizione ottimale dei pulsanti di controllo è all'altezza o al di sotto delle spalle. I dispositivi sono più facili da usare quando i controlli sono posizionati in modo razionale. Alcuni principi per la loro disposizione sono:

- Frequenza di utilizzo: i comandi che vengono utilizzati spesso devono essere collocati in una posizione conveniente come tra gomito e spalla. Questo è utile per i sistemi complessi in cui ci sono numerose funzioni.
- Principio di importanza: i comandi principali dovrebbero essere ubicati in una posizione conveniente.
- Sequenza d'uso: la disposizione dovrebbe riflettere la sequenza di funzionamento. Questo è utile per sistemi semplici. Ad esempio, se in orizzontale, il primo pulsante da utilizzare va collocato a sinistra, il secondo alla destra di questo e così via. Per i non vedenti è più facile leggere da sinistra a destra.
- Principio di raggruppamento funzionale: i comandi con funzioni strettamente connesse tra loro vanno posizionati uno accanto all'altro, rendendoli facilmente e chiaramente identificabili. Questi potrebbero condividere funzionalità spaziali, fisiche o temporali. I gruppi possono essere distinti da spaziature, dal colore, dalla forma, dalle dimensioni, dal limite dei bordi.
- Collocazione: questo riguarda la compatibilità con i display. Il layout dei comandi dovrebbe riflettere la visualizzazione sullo schermo, rendendo evidente il rapporto tra essi.
- Principio di coerenza: il layout con la forma dei componenti posti nella stessa posizione dovrebbe minimizzare la necessità di memoria e di ricerca. L'utilizzo di etichette e messaggi ridurrà il rischio di errori.
- Alcuni principi sono più importanti, ad esempio sequenza d'uso e principio di raggruppamento funzionale. Tutti questi principi possono entrare in conflitto, quindi è necessario distinguerli quando si applicano ad una progettazione specifica.

#### 4.8.2 Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI e SUI

La gestualità è uno dei modi utilizzati per poter comunicare tra individui nell'espressione di un significato: gesti tipici come puntare il dito, muoverlo in diverse direzioni, agitare la mano e anche il capo riguardano un linguaggio corporeo interpretabile in relazione al contesto culturale, geografico o linguistico. Di seguito si analizzano le tipologie di gestualità utilizzate per le interfacce di tipo TUI e SUI, nonché nell'interazione spaziale.

##### Gestualità su interfacce SUI

Durante il corso degli anni di ricerca e sviluppo, è avvenuta una standardizzazione dei codici gestuali utilizzati dai sistemi basati su interfacce SUI che servono come punto di partenza e di referenza per la progettazione di sistemi futuri. Le gestualità possono essere classificate come:

- "single-point"
- "multi-point"
- "multi-hand"
- "whole-hand"

Il sistema multi-touch per la singola mano sviluppato inizialmente da FingerWorks acquisita poi da Apple nel 2008 è caratterizzato da una serie di gestualità che permettono di mappare diversi input contemporaneamente al fine di:

- Emulare il mouse attraverso il puntamento, il click, il doppio click, click destro, drag/select e scroll
- Navigare sul web (touch and slide, zoom in and zoom out)
- Operare comandi sui file come aprire, salvare, creare un nuovo file e stampare, e comandi di editing semplici come taglia, copia, incolla
- Operare alcuni comandi semplici delle applicazione come exit, passare da un'applicazione all'altra e minimizzare.

Non tutte le gestualità sono naturali o intuitive ma, in relazione alle attività da intraprendere, possono essere adattate o imparate. In particolare, le gestualità più note sono molto semplici e supportano diverse funzioni:

- Un dito: puntamento per selezione, trascinamento, spostamento di elementi;
- Due dita: ingrandire l'immagine allargando le dita; rimpicciolire l'immagine ravvicinando le dita,
- Due dita: muovere ruotando o scalando

Un problema di interfaccia ed ergonomia rispetto all'utilizzo di interfacce SUI è la mancanza di precisione nella selezione e l'eventuale lentezza nella elaborazione dell'output o feedback. Al contrario, tale interfaccia possiede altri vantaggi quali la riduzione della fatica rispetto all'utilizzo delle mani.

La corretta progettazione di interfacce SUI si focalizza su:

- **Supportare i modelli mentali** sia in relazione all'efficienza sia al comfort;
- **Personalizzare la rappresentazione** permette all'utente di varie rappresentazioni dei dati che possano essere modificati in base alle preferenze dell'utente. Poter modificare la modalità di rappresentazione degli stessi dati contribuisce ad avere un effetto positivo sul processo decisionale;
- **Garantire una corretta percezione:** alcune considerazioni riguardano l'angolo di visione del soggetto, legende locali e/o globali.

### Istruzioni e dialogo

La comunicazione tra l'utente e il sistema di illuminazione può avvenire sotto forma di istruzioni dirette ad agire o tradurre il comando in un feedback luminoso (ad esempio, accendersi, selezionare una scena di luce) oppure attraverso una forma dialogica che permette l'interazione e l'equilibrio tra quando prestabilito ed i desiderata dell'utente (ad esempio un'interfaccia può proporre la migliore opzione, può chiedere alcune informazioni e quindi suggerire una possibile soluzione luminosa). In questo tipo di comunicazione, l'utente può interfacciarsi sia con sistemi TUI che SUI, manipolando oggetti oppure setting grafici.

### Parametri di illuminazione

Come precedentemente accennato, la possibilità di interagire con il sistema di illuminazione risiede anche nel tipo di informazione comunicata all'individuo che viene abilitato al controllo, modificazione e manipolazione di parametri di illuminazione rappresentati secondo forme più tecniche o più astratte. In particolare, l'interazione tra individuo e illuminazione può avvenire controllando:

- **i parametri di illuminazione:** l'utente manipola le caratteristiche dell'illuminazione direttamente, modificando ad esempio i livelli (dimming di flusso), la temperatura di colore o il colore dell'illuminazione, la distribuzione luminosa spaziale;
- **il comportamento dell'illuminazione:** l'utente controlla scenari di illuminazione preimpostati in maniera tale da determinare un'atmosfera luminosa<sup>34</sup> (rilassante, vivace, etc.). In questo caso, l'individuo è ancora in grado di manipolare l'illuminazione e gli si richiede un minor carico di conoscenza del sistema di illuminazione: la scelta è basata sul comportamento che si vuole ottenere dall'illuminazione;
- **la luce in relazione all'attività da compiere:** l'utente controlla scenari preimpostati in maniera tale da accompagnare specifici contesti o specifiche attività (come lettura, lavoro concentrato, relax, etc.)

## 4.9 Scenari di interazione con l'illuminazione di un contesto industriale

Nell'ambito lavorativo, è importante progettare condizioni di lavoro che evitino di sottoporre l'uomo a carichi mentali non compatibili che comportino affaticamento<sup>26</sup> e stress negativo. L'interazione con l'illuminazione, sia essa generale che localizzata, deve avvenire dunque nel rispetto dell'ergonomia fisica e cognitiva, cercando di aiutare l'utente nello svolgimento del lavoro senza produrre fatica mentale, sovraccarico di informazioni e operazioni da effettuare. Nei successivi paragrafi verranno presentati degli scenari di utilizzo che tengono in considerazione il rapporto dell'utente con l'illuminazione sia localizzata che generale ed esplorano, attraverso esperienze via via più complesse e sofisticate, le possibilità di interagire con l'illuminazione attraverso sistemi completamente manuali controllati direttamente dall'utente e sistemi automatizzati oppure con un sistema di controllo ibrido che risulta dalla mediazione dei precedentemente enunciati.

## 4.10 Controllo ibrido del sistema di illuminazione industriale

In un contesto industriale, si è ipotizzata l'importanza di progettare un **sistema di illuminazione a LED con controllo ibrido**, ovvero sia automatizzato con completo controllo da parte del sistema stesso basato su sensori di tipo contestuale e allo stesso tempo con la completa possibilità, da parte dell'utente, di interagire con l'illuminazione quando ne ha necessità. La relazione tra il sistema di illuminazione e l'utente si

---

<sup>26</sup> L'affaticamento rappresenta la risposta agli stimoli che interferiscono con un essere umano, fino a condizionarlo mentalmente, i cui effetti, a breve termine, risentono di una forte componente psicologica, poiché l'individuo li affronta e li gestisce sulla base delle proprie caratteristiche di personalità e del proprio vissuto

configura in forma di dialogo per cui, data una situazione di illuminazione preimpostata dal sistema, l'utente potrà sempre intervenire per manipolare la performance luminosa seguendo dei suggerimenti che derivano dal sistema stesso oppure personalizzando completamente lo scenario luminoso. Diversamente, il sistema di illuminazione non è staticamente preimpostato ma è in grado di adattare il proprio comportamento nel tempo imparando dagli utenti sia gli scenari di illuminazione personali impostati dagli utenti come maggiormente confortevoli o funzionali allo scopo lavorativo.

Un sistema di illuminazione con controllo ibrido è caratterizzato dalla capacità del sistema di illuminazione di programmare e calibrarsi automaticamente, per mezzo dell'analisi dei dati esterni, le performance di illuminazione e allo stesso tempo di permettere all'individuo di recuperare il controllo dell'illuminazione interrompendo e ricalibrando il sistema quando necessita e desidera. In particolare, l'utente in questo senso diventa non solo il centro focale per cui l'intero sistema di illuminazione funziona ma anche un ulteriore sensore prioritario del sistema, gerarchicamente superiore e da cui è possibile derivare dati utili per performance luminose future.

Il sistema ibrido, infatti, prevede che l'utente possa manualmente impostare l'illuminazione come meglio preferisce e che tale informazione venga registrata dal sistema per essere eventualmente richiamata in seguito perché potenzialmente fornisce dati migliorativi sulla performance luminosa stessa. Può capitare infatti che i settaggi automatici del sistema di illuminazione non siano particolarmente consoni allo svolgimento di una particolare attività oppure che non siano soddisfacenti per le capacità visive e/o per le preferenze specifiche di un individuo.

Tutti i dati raccolti ed utilizzati per calibrare il sistema di illuminazione ibrido possono essere memorizzati e costituiscono un database molto interessante sia per comprendere i consumi energetici in un dato periodo, ma anche per mettere in relazione le performance luminose alle performance lavorative oppure le performance luminose e la personalizzazione da parte degli utenti.

Lo scopo generale di un funzionamento ibrido è quello di **ridurre l'illuminamento globale per ottenere efficienza energetica basata sul comfort degli individui**. L'output luminoso viene regolato nei diversi apparecchi di illuminazione posti nel laboratorio controllando singolarmente il flusso (dimming).

Il sistema di gestione deve essere molto semplice ed avere un'interfaccia immediata, comprensibile e a bassa complessità in maniera da poter da un lato **semplificare le operazioni di progettazione degli scenari di illuminazione da parte di un utente professionale** che si occupi della gestione del sistema di illuminazione, da un altro quello di **ridurre la complessità per l'utente finale** (ovvero il lavoratore nel laboratorio industriale) che debba gestire l'illuminazione. Proprio la semplificazione e la riduzione della complessità sono state le linee guida concettuali per la progettazione di un sistema di interfaccia che favorisca il controllo da parte del sistema stesso e da parte dell'utente. La logica è che performance di illuminazione più sofisticate e complesse non devono richiedere sforzi ulteriori durante l'interazione da parte degli utenti. Il sistema di illuminazione è pensato per poter funzionare secondo i diversi scenari proposti nello schema di seguito riportato (Figura 56).

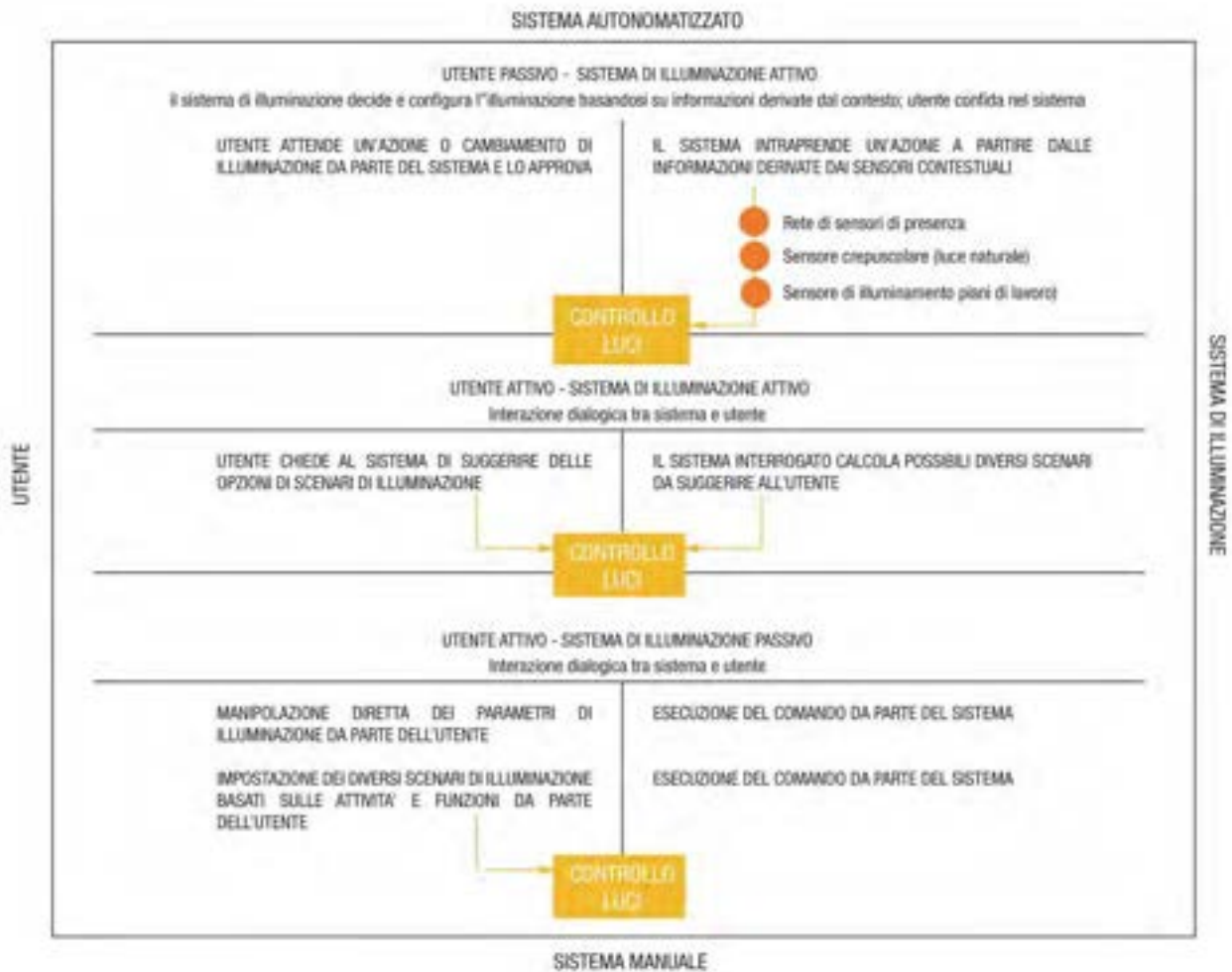


Figura 56 Schema di funzionamento del sistema di controllo dell'illuminazione in modalità ibrida

## 4.11 Esperienza di controllo del sistema d'illuminazione completo

L'illuminazione generale è garantita da 6 apparecchi HumbleBee installati a soffitto nel laboratorio Hall tecnologica di ENEA preso in considerazione come caso studio. In aggiunta a questi si è ipotizzata la necessità di installare degli apparecchi di illuminazione localizzata sia per aumentare le prestazioni visive (e quindi i livelli di illuminamento) nelle zone in cui i compiti visivi sono più complessi sia per dare la possibilità di personalizzare la performance luminosa ottenendo allo stesso tempo un'elevata efficienza energetica.

Il sistema di apparecchi di illuminazione (generale e localizzata) è integrato e messo a sistema in un network Smart di controllo che gestisce le informazioni in entrata e in uscita in maniera wireless. Il sistema progettato dal gruppo di ENEA utilizza il protocollo di comunicazione wireless ZigBee e comunica con i dispositivi luminosi (attuatori) e il sistema di sensori per il rilievo della presenza e dell'illuminazione naturale attraverso un'interfaccia e un sistema di controllo volto alla regolazione manuale dell'illuminazione. Il sistema è stato pensato per operare dunque sia nella modalità ibrida sia automatica (calibrando i livelli di illuminazione mediante fotosensori e regolando l'illuminazione in presenza di persone) sia manuale (mediante un'interfaccia SUI e TUI).

### 4.11.1 Modalità automatica

#### Input del sistema di illuminazione automatizzato

Questa modalità è costantemente attiva, in grado di controllare tutti gli apparecchi del laboratorio e di modificare lo scenario di illuminazione in base a diversi input integrati tra di loro:

- in base al momento della giornata e al periodo dell'anno (timer),
- in base ad una specifica circostanza,
- in base a quanto rilevato dai sensori contestuali di vario genere come:
  - sensori crepuscolari per rilevare la presenza di luce naturale (adeguatamente posizionati nello spazio per coprire zone diverse, vicine o lontane da finestrate),
  - luxmetri per rilevare la quantità di illuminamento sui piani di lavoro (eventualmente integrati negli apparecchi di illuminazione localizzata),
  - una rete di sensori di presenza come infrarossi (PIR), ultrasonici e di movimento opportunamente posizionati nello spazio e/o eventualmente integrati a bordo degli apparecchi di illuminazione per rilevare la presenza/assenza di individui come pure la loro distribuzione spaziale e anche il numero di soggetti presenti.

La modalità automatica basata su queste premesse è un sistema usato tradizionalmente per il controllo dell'illuminazione volto alla riduzione dei consumi per ottenere l'illuminazione solo dove e quando necessario. La logica di funzionamento si basa sulla messa a sistema di diversi sensori e programmazione temporizzata di eventi per evitare falsi rilievi e comportamenti del sistema che non siano ben accetti. Infatti, è stato dimostrato che i sistemi basati sulla tecnologia di rilevamento dell'occupazione della stanza (PIR) non sono sufficientemente attendibili e spesso falliscono nel rilevare la presenza di persone nel momento in cui queste stiano ferme. Per questo motivo, oltre ad un corretto posizionamento e coordinamento degli input dei diversi sensori, il sistema viene integrato con un timer, in modo tale che sia calcolato un periodo di tempo dopo il rilievo per il cambiamento di status dell'illuminazione.

In aggiunta a questo, uno scenario futuribile potrebbe prevedere l'automatizzazione della personalizzazione dell'illuminazione mediante riconoscimento diretto del lavoratore che, entrando in servizio viene monitorato tramite il suo badge identificativo che raccoglie sia le informazioni relative al "dove si trova" e "quale attività stia facendo" ma anche informazioni di preferenze personali che vengono trasferite al sistema di illuminazione in modo tale da personalizzare l'illuminazione localizzata calibrandola

secondo le sue esigenze e specificità nel rispetto di altri potenziali utenti che utilizzino lo spazio contemporaneamente.

Un ulteriore scenario futuribile potrebbe essere quello di monitorare i valori biometrici degli individui mediante actigrafi e sistemi sensorizzati miniaturizzati ed indossabili (sulla tipologia del Fitbit che serve a monitorare il sonno e l'attività fisica su base quotidiana), che rilevino soprattutto lo stress e l'affaticamento nonché le capacità cognitive e di concentrazione durante l'intera sessione lavorativa al fine di inviare non solo dei segnali di allerta e di attenzione all'individuo sul proprio status di salute ma anche e soprattutto di modificare l'illuminazione localizzata in maniera da supportare il corretto e confortevole svolgimento delle operazioni tenendo conto delle esigenze specifiche individuali variabili durante il periodo di lavoro.

### **Output luminoso nel sistema di illuminazione automatizzato**

Come output luminoso, il sistema **sarà in grado principalmente di regolare il flusso e di modificare la distribuzione luminosa nello spazio nei singoli apparecchi di illuminazione**, seguendo principi di buona illuminazione basati sulla percezione di comfort degli individui. In particolare è stato evidenziato che le persone non siano in grado di percepire in maniera cosciente riduzioni di luminanza del 20%<sup>35</sup> e che l'occhio umano sia particolarmente sensibile (dopo un certo periodo di adattamento) alle transizioni tra luoghi luminosi e luoghi più bui. Saranno dunque impostati degli scenari di illuminazione prestabiliti che funzionano a prescindere dall'intervento diretto e manuale del singolo soggetto o della collettività degli individui che utilizzeranno lo spazio. In particolare, si ipotizzano le seguenti **strategie di illuminazione**:

- **Illuminazione adattiva** consiste nell'utilizzo di livelli di illuminazione progressivi di passaggio tra lo scenario di stand-by (quando nessuno è nel locale) e lo scenario di illuminazione che si attiva quando viene avvertita la presenza di un utilizzatore nello spazio. La compensazione adattiva dell'illuminazione si basa sull'aumento progressivo dei livelli, con rapporti di luminanza costanti tra gli spazi contigui soprattutto tra postazione di lavoro e area circostante, tra ingresso e spazi lontani dall'osservatore in modo da seguire i flussi di movimento nello spazio e di accomodare l'illuminazione secondo il livello di comfort dell'occhio umano.
- **Predizione di occupazione dello spazio** consiste nell'impostare degli scenari di illuminazioni basati sui turni di lavoro del laboratorio in modo tale da predire quando uno spazio è sul punto di essere occupato e creare l'appropriata illuminazione nel momento in cui lo spazio stesso sarà occupato.
- **Illuminazione focalizzata sulle zone di attività** consiste nell'illuminazione con maggiori livelli di illuminamento dell'area dove l'attività e il compito visivo si stanno svolgendo facendo uso degli apparecchi di illuminazione localizzata. I diversi settaggi dell'illuminazione derivano dalle funzioni svolte in tale postazione di lavoro (maggiore per attività di ispezione e controllo e per attività di lavorazione su macchine utensili, medie per attività di montaggio e minori per attività di limitata concentrazione). L'illuminazione generale viene controbilanciata in modo da ristabilire un rapporto di luminanza consono utile sia al comfort visivo sia all'efficienza energetica.
- **Illuminazione diurna** consiste nell'illuminazione regolata in base alla presenza della luce naturale. I vari sensori di illuminamento sono impostati al fine di ottenere circa 300 lux sul piano orizzontale passante a 80 cm d'altezza da terra. (Figura 63)
- **Illuminazione notturna** consiste nell'illuminazione delle ore serali, in assenza di luce naturale.

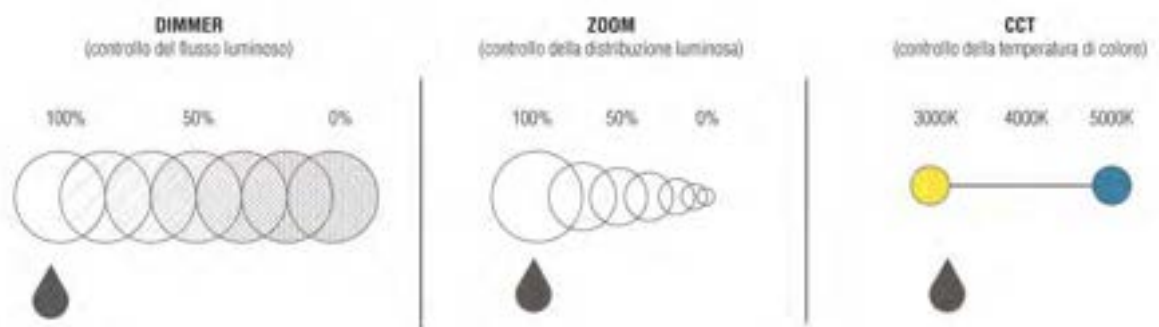
- **Illuminazione stand-by** consiste nell'illuminazione in assenza di persone, momento in cui il sistema può essere impostato completamente spento durante le ore di chiusura del laboratorio oppure dimmerato del 20% durante le ore lavorative.

#### 4.11.2 Modalità manuale

Il controllo dell'illuminazione in questo ambiente di dimensioni comunque limitate e con un circoscritto numero di apparecchi di illuminazione è stato affidato ad un'interfaccia SUJ. Il sistema di gestione è dunque stato pensato come un'applicazione software in grado di essere controllata su dispositivi mobili personali o localizzati nello spazio (smart phone, touch screen e tablet) e su dispositivi integrati tramite controllo tattile fissato a parete.

Il controllo manuale provvede a conferire all'individuo e al sistema di illuminazione opportunità aggiuntive che riguardano la possibilità di migliorare l'atmosfera di illuminazione lavorativa e di personalizzazione della stessa. La possibilità di interagire con il sistema è stata pensata secondo due livelli di comunicazione:

- **manipolazione dei parametri di illuminazione:** modificazione della performance luminosa del singolo apparecchio oppure di un gruppo di apparecchi (relativi all'illuminazione generale e anche localizzata), in termini di distribuzione della luce (ampiezza del fascio), quantità di flusso (dimming), della temperatura di colore (quando possibile tecnologicamente).(Figura 57)



**Figura 57** Icone di interfaccia per la manipolazione dei parametri di illuminazione del sistema localizzato e generale.

- **manipolazione della luce in termini di attività e funzioni svolte:** modificazione dell'illuminazione in base a specifiche attività svolte che vengono selezionate nel sistema di interfaccia. L'interfaccia si pone in forma dialogica rispetto all'utente suggerendo possibili soluzioni luminose in base ad attività selezionabili del tipo di elevata complessità e concentrazione (come lavoro di ispezione e controllo, lavoro su macchinari utensile), lavoro di media complessità e concentrazione (come lettura e assemblaggio parti), modalità standby, modalità diurna, modalità notturna. Tali settaggi luminosi prestabiliti possono a loro volta essere manipolati per permettere sia una più approfondita personalizzazione da parte dell'individuo sia un'eventuale correzione del pre-set che il sistema di illuminazione immagazzina in memoria (assegnando una nuova icona). (Figura 58)










	ICONE	TIPOLOGIA DI ATTIVITÀ	OUTPUT LUMINOSO	
ILLUMINAZIONE LOCALIZZATA		ISPEZIONE E CONTROLLO	TEMPERATURA DI COLORE A 4000K MASSIMO FLUSSO EMESSO ILLUMINAMENTO MEDIO SUL PIANO DI 1500 LUX AMPIEZZA DEL FASCIO NARROW	LAVORO DI ELEVATA CONCENTRAZIONE
		LAVORO SU MACCHINA UTENSILE	TEMPERATURA DI COLORE A 4000K MASSIMO FLUSSO EMESSO ILLUMINAMENTO MEDIO SUL PIANO DI 1000 LUX AMPIEZZA DEL FASCIO MEDIUM	LAVORO DI ELEVATA CONCENTRAZIONE
		LAVORO DI ASSEMBLAGGIO	TEMPERATURA DI COLORE A 4000K MEDIO FLUSSO EMESSO ILLUMINAMENTO MEDIO SUL PIANO DI 500 LUX AMPIEZZA DEL FASCIO WIDE	LAVORO DI MEDIA CONCENTRAZIONE
ILLUMINAZIONE GENERALE		MODALITÀ STAND-BY	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE LOCALIZZATA OFF SISTEMA DI ILLUMINAZIONE GENERALE DIMMERATA AL 20%	
		MODALITÀ DIURNA	SISTEMA IN COMPENSAZIONE CON L'ILLUMINAZIONE NATURALE	
		MODALITÀ NOTTURNA	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE IN CONDIZIONI DI LIMITATA ILLUMINAZIONE NATURALE E DURANTE LE ORE SERALI	
		NUOVA MODALITÀ PERSONALIZZATA	CUSTOMIZZAZIONE DELLE CARATTERISTICHE LUMINOSE	

Figura 58 Icone di interfaccia del sistema di controllo manuale basato su attività e funzioni

Del sistema di interfaccia precedentemente stabilito sono state ipotizzate le funzionalità e le caratteristiche grafiche per una corretta, ergonomica e semplificata interazione tra utente e sistema sia in modalità SUI sia TUI.

#### 4.11.3 Sistema di interfaccia SUI

Il sistema SUI permette agli utenti di controllare l'illuminazione localizzata e generale mediante interfaccia computer, tablet e tramite un sistema touch-screen posizionato a muro. L'applicazione scaricabile su smartphone è stata pensata per l'utente finale (lavoratore) e quindi semplificata e limitata al solo controllo delle performance luminose e alla creazione degli scenari di illuminazione per un utente più esperto ed autorizzato.



Figura 59 Interfaccia SUI su dispositivi computer, tablet e sistema touch-screen posizionato a muro.

#### Caratteristiche grafiche dell'interfaccia completa

Le caratteristiche grafiche della piattaforma saranno simili per la versione utilizzabile dall'utente finale e la versione di gestione controllo da parte del manager del sistema di illuminazione. In particolare, l'interfaccia progettata secondo le regole armoniche della sezione aurea, sarà divisa in tre blocchi funzionali:

- sulla sinistra una finestra di visualizzazione tridimensionale dello spazio orientabile e/o visibile in pianta per il controllo della performance luminosa e la creazione dei profili di illuminazione automatizzati tramite sistema drag and drop degli elementi sia attuatori (apparecchi di illuminazione) che sensori;
- sulla destra il lighting manager che permette di sfogliare i menù, identificabili attraverso diversi codici cromatici. In particolare sono evidenziate tre macro categorie: la progettazione degli scenari, le performance luminose e le analisi statistiche dei dati rilevati e archiviati;
- in alto un'ulteriore serie di menù a tendina che evidenziano funzionalità di navigazione e ripropongono le stesse voci dei menù inserite nel lighting manager;

Saranno prevalentemente utilizzati

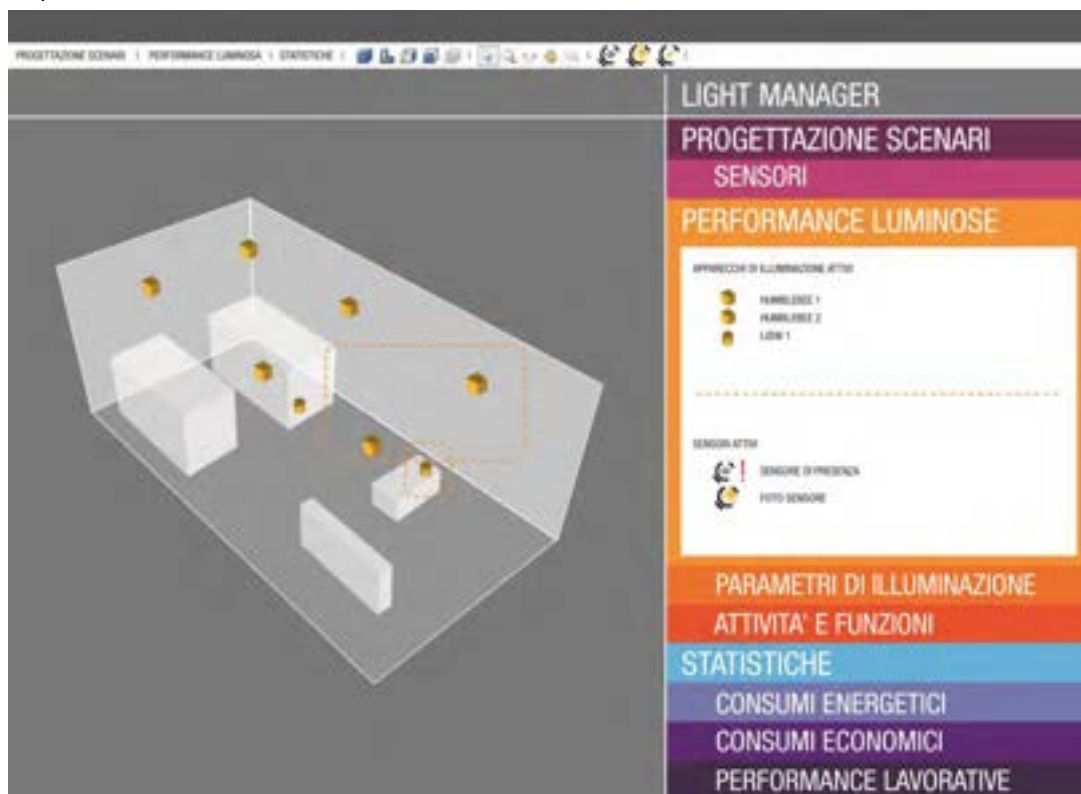
- icone grafiche per i controlli di interfaccia utente con spiegazione testuale a lato (eventualmente il testo può essere nascosto);
- Il touch screen permetterà sia di individuare le aree da selezionare (singolo click) sia di aprire contenuti (doppio click) sia di zoomare nello spazio (utilizzo delle due dita). Inoltre le informazioni contenute nel lighting manager potranno essere trascinate (drag and drop) nella visualizzazione tridimensionale dello spazio.
- Codici cromatici ripetuti e consolidati durante la navigazione nelle diverse modalità;

Alla grafica dell'interfaccia statica precedentemente impostata si aggiungeranno nel tempo nuove icone relative alle funzionalità personalizzate dagli utenti relative alle performance luminose. Al contempo, il sistema è stato pensato come un archivio in grado di monitorare, registrare e successivamente mostrare, tramite visualizzazione di analisi statistiche le informazioni relative a consumi energetici, costi, performance luminose (illuminamenti rilevati), monitoraggio malfunzionamenti, monitoraggio presenze, utilizzo in modalità automatica vs manuale, settaggi manuali della performance di illuminazione.

### Funzionalità

L'interfaccia permette il controllo della **performance luminosa** in termini di:

- controllo del singolo e di un gruppo di apparecchi;
- controllo di eventuali malfunzionamenti nei dispositivi sia di illuminazione che nei sensori; (Figura 60)



**Figura 60 Modalità di controllo di apparecchi di illuminazione, singoli o in gruppo e di controllo di sensori con segnalazione di malfunzionamenti**

- controllo dei parametri di illuminazione sia generale che localizzata (dimming, distribuzione luminosa, temperatura di colore come in Figura 61);

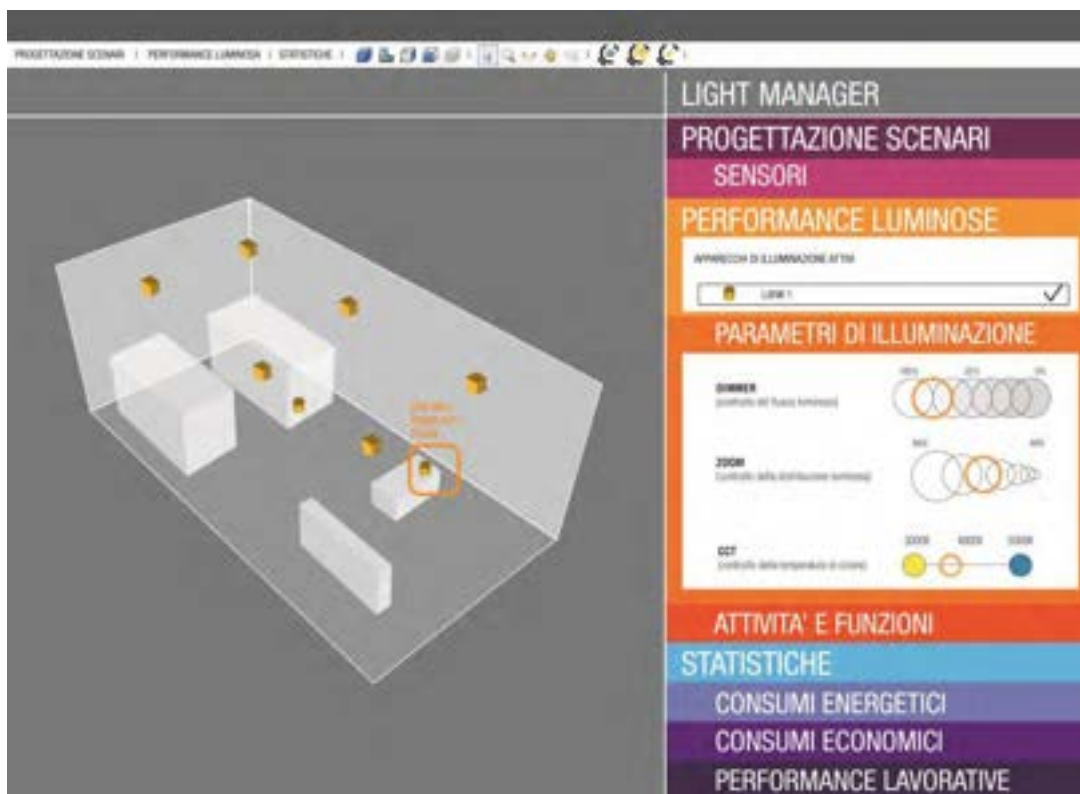


Figura 61 Interfaccia di controllo dei parametri di illuminazione per i singoli apparecchi attivi nello spazio

- controllo delle performance luminose in base alle diverse attività e funzioni svolte (cfr. Figura 58 e Figura 62)

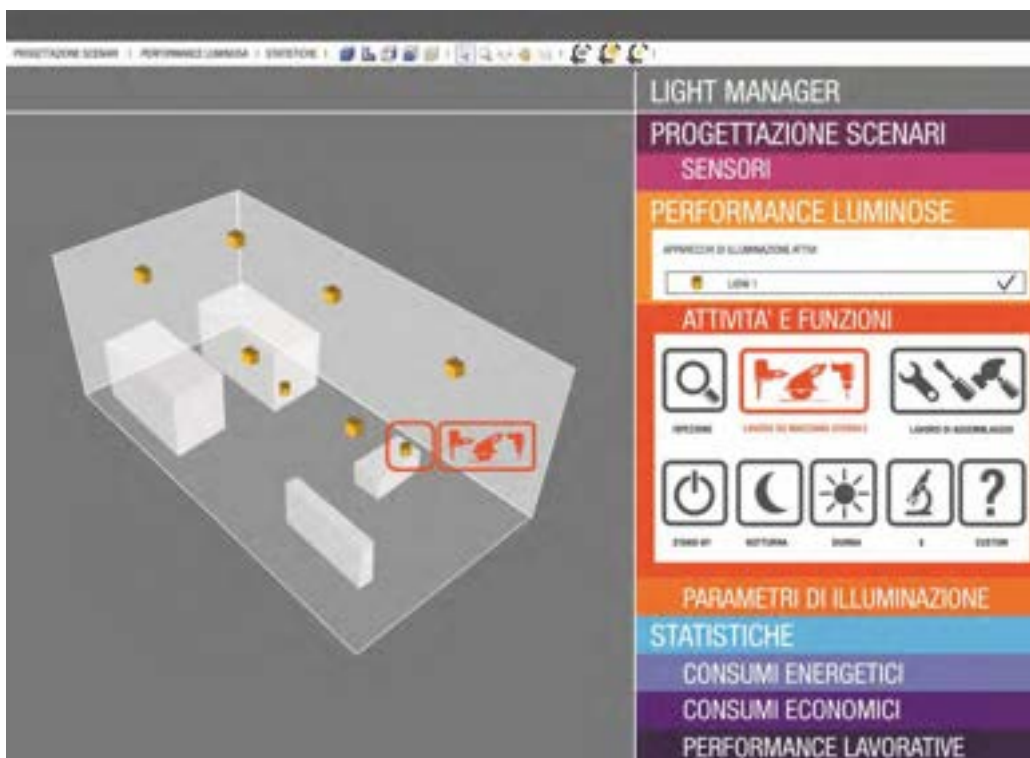


Figura 62 Interfaccia di controllo manuale dell'illuminazione per i singoli apparecchi attivi nello spazio mediante indicazione delle attività svolte

L'interfaccia permette la creazione di scenari di illuminazione automatizzati mediante:

- collegamento dei sistemi di monitoraggio (sensori) alle performance luminose;
- definizione delle performance luminose. (Figura 63)



**Figura 63 Esempio di configurazione degli scenari luminosi: corrispondenza tra sensori e apparecchi di illuminazione**

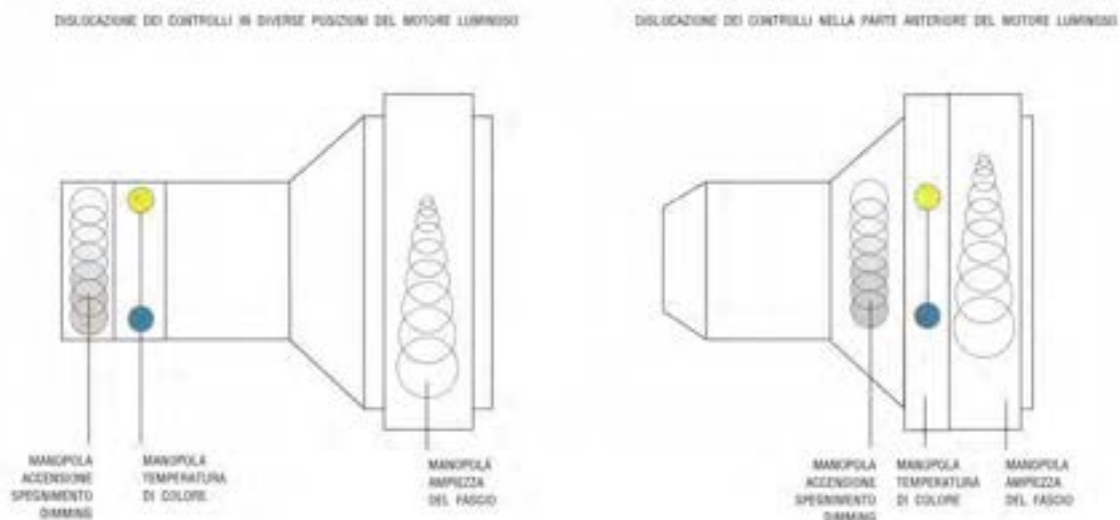
Infine l'interfaccia funziona da archivio delle performance del sistema ed è in grado di visualizzare

- Il consumo energetico ascrivibile all'impianto di illuminazione: impatto energetico visualizzato tramite dashboard dei consumi energetici attuali, momentanei e cumulativi nel tempo;
- I costi ascrivibili all'impianto di illuminazione: impatto economico visualizzato tramite dashboard dei consumi economici attuali, momentanei e cumulativi nel tempo;
- Monitoraggio e visualizzazione delle performance luminose in relazione alle performance lavorative: tramite dashboard che evidenzia le caratteristiche di illuminazione (illuminamenti nello spazio) e che eventualmente possa determinare relazioni tra le attività lavorative e la luce.

## 4.12 Esperienza di controllo del sistema di illuminazione localizzata

### 4.12.1 Interfaccia di controllo utente di tipo TUI (illuminazione localizzata)

La relazione con lo strumento di illuminazione è stata progettata al fine di essere familiare ed integrata con le gestualità quotidiane, cognitivamente semplice da comprendere e manipolabile anche mediante l'utilizzo di guanti da lavoro. A questo scopo, l'interfaccia di controllo dell'illuminazione localizzata è stata inserita a bordo del motore luminoso, oggetto dalle dimensioni e dal peso limitato, facilmente raggiungibile perché posizionata frontalmente e manipolabile mediante punti di presa facilmente avvistabili (Figura 64). Il controllo è stato integrato all'apparecchio stesso al fine di ottimizzare le operazioni; in questo senso, elementi esterni come ad esempio telecomandi e strumenti di controllo da banco o scrivania risultano rendere le attività lavorative dell'individuo più complesse per raggiungere gli stessi scopi.



**Figura 64 Due diverse opzioni di dislocazione dei controlli dei parametri di illuminazione nel motore luminoso: a sinistra posizionamento anteriore e posteriore dei diversi controlli; a destra collocazione nella parte anteriore.**

Il sistema di illuminazione localizzato può essere modificato attraverso la manipolazione dei parametri di illuminazione (accensione e spegnimento, dimming, zoom e temperatura di colore) attraverso gestualità cognitivamente apprese e note e un mapping che distingue le diverse funzioni tramite forme, dimensioni, cromaticità e icone di funzionamento. Nella tabella riportata di seguito vengono messe in evidenza le funzioni di controllo della performance luminosa (tramite parametri luminosi) con il sistema di input dell'interfaccia TUI di controllo. Visualizzazioni dell'interfaccia applicata al prodotto sono state inserite anche nel paragrafo 5.12 Il progetto L@W: Light at work.

**Tabella 1: Interfaccia TUI per l'illuminazione localizzata: funzioni di controllo dell'interfaccia (input e output)**

Funzioni di controllo della performance luminosa	Input			Output	
	Tipologia di interfaccia di controllo	Gestualità e movimenti	Caratteristiche del controllo	Rappresentazione dell'informazione	Performance luminosa
Accensione e spegnimento Dimming (ovvero controllo del flusso luminoso)	TUI Manopola con movimento di rotazione orario e antiorario.	Rotazione della mano da 0° a 270° per accensione e regolazione del flusso: 0° l'apparecchio risulta spento; 270° l'apparecchio risulta al massimo della performance luminosa. Rotazione della mano da 270° a 0° per il dimming del flusso verso lo spegnimento.	Dimensioni e spessore studiati per l'ergonomia; Presenza di un grip superficiale per migliorare la presa; rotazione da 0 a 270° con inizio e fine corsa segnalati da icone per consentire la lettura di una scala tra un valore minimo e un massimo; Differenziazione cromatica della manopola.	Feedback sonoro (click) di accensione e spegnimento; feedback luminoso nella manopola stessa.	L'apparecchio emette un flusso luminoso che aumenta man mano che la manopola viene ruotata in senso orario fino a raggiungere il suo massimo valore. Lo spegnimento avviene mediante rotazione in senso antiorario.
Cambiamento della temperatura di colore (laddove tecnologicamente possibile)	TUI Manopola con movimento di rotazione orario e antiorario.	Rotazione della mano da 0° a 270° per modifica della temperatura di colore da calda (3000K) a fredda (6000K) considerati come i valori di massimo e minimo.	Dimensioni e spessore studiati per l'ergonomia; Presenza di un grip superficiale per migliorare la presa; rotazione da 0 a 270° con inizio e fine corsa segnalati da icone per consentire la lettura di una scala tra un valore minimo e un massimo; Differenziazione cromatica della manopola.		Trasformazione della CCT da calda a fredda in base al movimento della manopola
Zooming del fascio luminoso (modificazione della distribuzione luminosa con diversi fasci narrow - wide)	TUI Manopola con movimento di rotazione orario e antiorario.	Rotazione della mano da 0° a 110° e viceversa per la regolazione dello zoom: a 0° il fascio risulta al massimo dell'ampiezza; a 110° il fascio risulta al minimo dell'ampiezza. Rotazione oraria per la riduzione dell'ampiezza del fascio; rotazione antioraria per l'aumento di ampiezza del fascio.	Dimensioni e spessore studiati per la prensilità e l'ergonomia della mano; rotazione da 0 a 110° con inizio e fine corsa segnalati da icone per consentire la lettura di una scala tra un valore minimo e un massimo; Differenziazione cromatica della manopola.	Feedback meccanico (attrito) che segnala i fine corsa (valori massimo e minimo).	L'ampiezza del fascio luminoso aumenta o diminuisce insieme al movimento dello zoom.

#### 4.12.2 Interfaccia di controllo dell'illuminazione localizzata di tipo SUI

La semplificazione dell'interfaccia e delle operazioni di interazione con lo strumento di illuminazione sono funzionali ad un miglioramento della performance lavorativa e alla creazione di un rapporto intuitivo di controllo e personalizzazione dell'atmosfera luminosa del proprio compito visivo. Al contempo, la configurazione TUI precedentemente descritta presenta alcune limitazioni alla personalizzazione e alla

digitalizzazione delle informazioni. Per implementare le operazioni di personalizzazione e aumentare le opzioni di controllo, è stata ipotizzata un'interfaccia di tipo SUI funzionante come applicazione (app) per smart-phone personale (Figura 65) che permette il funzionamento dell'illuminazione automatizzato a manuale.



**Figura 65** Interfaccia di controllo SUI per smart phone con limitazione al solo controllo delle performance luminose

In questo senso, l'interfaccia di tipo SUI funzionante come applicazione (app) per smart-phone personale è in grado di fornire la possibilità di trasformare l'illuminazione sia tramite manipolazione dei parametri di illuminazione sia attraverso la selezione di scene. L'app fornisce all'utente la possibilità di impostare dei pre-set, ovvero delle scene di illuminazione selezionabili in base a determinati specifici scenari di lavoro, attività e funzioni svolte. Questa opzione ulteriore di regolazione della performance luminosa per scenari preimpostati potrebbe essere un valore aggiunto nell'interazione con l'illuminazione localizzata perché permette di alleggerire le operazioni e lo sforzo cognitivo dell'utente nel manipolare la propria illuminazione, aumentando le possibilità e le libertà di controllo. Inoltre, il sistema permette di poter registrare nuove scene personalizzate che possano successivamente essere richiamate dalla memoria. Al contempo, è in grado di modificare l'illuminazione generale e di memorizzare le informazioni digitali per questioni di analisi statistica su consumi, scene utilizzate, performance luminose preferite.



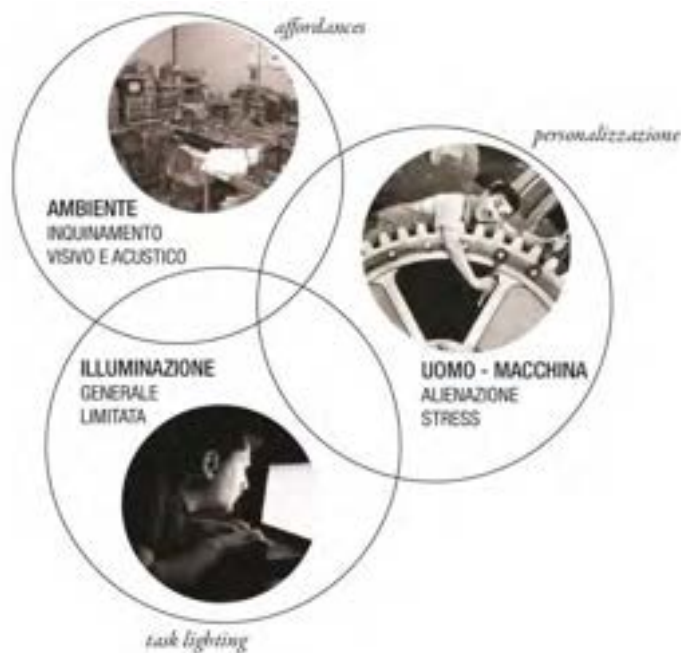
**Figura 66** A sinistra la modalità di selezione degli apparecchi luminosi; al centro la modalità di gestione dell'illuminazione tramite parametri e a destra la gestione tramite scenari riferiti alle attività e funzioni lavorative svolte.



## 5 Capitolo B.3 Proposta del concept di un sistema di illuminazione che integri le funzioni di illuminazione generale e quella di illuminazione localizzata per una postazione di lavoro tipo, tenuto conto dei risultati ottenuti durante la fase iniziale di definizione dei requisiti

### 5.1 Il lavoro di tipo industriale: l'uomo, l'ambiente la luce

Il rapporto tra l'uomo, la macchina intesa come strumento del lavoro, l'ambiente e l'illuminazione è molto importante: solo mediante la corretta progettazione di questi tre elementi si definisce un luogo lavorativo confortevole, sicuro, efficace ed efficiente in cui siano limitati gli errori dell'individuo e comunque si possa agire in massima sicurezza per il compimento delle operazioni di lavoro.



### 5.2 Le attività di lavoro: relazione uomo-macchina

Il lavoro industriale può essere esemplificato nel rapporto e interazione tra l'uomo e la macchina, due entità distinte che entrano in correlazione tra loro. In particolare, l'agire umano nel rapporto con questi artefatti si fonda e basa sui diversi fenomeni di percezione e azione correlati tra loro:

- percezione, ovvero il mezzo attraverso cui le informazioni acquisite tramite i sensi vengono trasformate in esperienza di oggetti, situazioni, sensazioni;
- cognizione che include tutti i processi mentali interpretabili come esperienze di apprendimento;
- emozione che riguarda i processi di valutazione, è volontaria e difficilmente controllabile. È regolata da processi ormonali e neuronali;
- volontà che è responsabile della trasformazione di un desiderio in un obiettivo da raggiungere;
- movimento che è l'ultimo livello della struttura di un'azione e dipende dai meccanismi di controllo e coordinazione e può essere volontario o involontario.

L'azione umana nel compito e operare lavorativo è diretta da intenzioni, può essere modificata improvvisamente e radicalmente, può essere dunque adattabile e flessibile a diversi scopi, può essere eseguita a ritmi scanditi o variabili ma anche attiva e creativa. Dal momento che l'agire umano ha un'origine sia di natura volontaria che involontaria, fisiologica e psicologica, alcune azioni possono essere meno progettate e risultate approssimate, illogiche ed emozionali.

L'azione della macchina è spesso conseguenza dell'azione dell'uomo e può essere modificata dall'utente. La macchina dunque, sia elettronica che meccanica svolge un'azione passiva ed esecutiva, accurata logica e razionale il cui svolgimento corretto dipende sia da una corretta gestione della macchina sia dai corretti comandi impostati e imposti dall'operatore.

Nelle ore di un turno di lavoro, l'uomo entra in contatto con la macchina per azioni spesso ripetitive e monotone che determinano spesso frustrazione ed alienazione nell'individuo costretto a partecipare al lavoro per una piccola parte di una intera catena produttiva. In questo senso, il recupero della capacità di controllare il proprio ambiente, mediante la **personalizzazione dell'illuminazione** è un fattore molto importante per la definizione di un'atmosfera lavorativa consona alle proprie esigenze visive.

Inoltre, le diverse attività di lavoro sono caratterizzate da diversi compiti visivi ed esigono sforzi di concentrazione, accuratezza di movimento e di visione del dettaglio o della scena complessiva eterogenei, tanto da definire diversi requisiti di illuminazione. Nella seguente tabella vengono riassunti i principali.

Macchina	Area	Compito visivo /attività	Complessità del lavoro	Necessità visive	Requisiti dell'illuminazione localizzata
Utensile: tornio/fresa/trapano colonna/sega/presa etc	Area dell'utensile	Lavorazioni semiautomatizzate e manuali di varia tipologia sulle macchine e macchinari	Elevata: pericolosità e necessità di sicurezza	Elevata: accuratezza dei movimenti e acuità visiva in tutte le zone di contatto tra macchina e uomo	Elevato illuminamento sui piani di lavoro. Direzionalità del fascio di luce.
Utensile: macchina da cucire	Area dell'utensile e banco di lavoro	Lavorazione sui macchinari. Attività di cucitura, inserimento e manipolazione di elementi minuti. Attività di ispezione e controllo.	Media: pericolosità e necessità di accuratezza	Elevata: acuità visiva dei colori, della trama, del tessuto, dei dettagli di lavorazione	Elevato illuminamento sul piano di lavoro. Direzionalità del fascio di luce per la visione di trame diverse. Distribuzione spettrale modificabile per la visione di diversi colori
Comandi separati dallo strumento	Zona di comando a colonna /videoterminal e	Attivazione/disattivazione comandi; controllo delle operazioni, lettura dei pulsanti e dei display; selezione delle informazioni, prendere decisioni. Manutenzione	Media	Media: acuità visiva nel discernere e comprendere i comandi differenziati (colore, dimensioni testi, contrasto display, contrasto oggetto e sfondo)	Medio illuminamento sul piano. Evitare un contrasto netto con il surround. Evitare l'abbagliamento diretto e riflesso sul pannello.
Strumenti manuali portatili elettrici: trapano/avvitatore/levigatrice orbitale/sparapunti etc	Banco di lavoro o zone diverse in cui è collocato l'artefatto (se di dimensioni diverse)	Lavorazioni eterogenee sull'artefatto. Assemblaggio / Disassemblaggio etc Attività di ispezione e controllo.	Elevata: necessità di sicurezza e di accuratezza nelle attività	Media: acuità visiva dei dettagli e dello sfondo	Medio-elevato illuminamento sul piano. Direzionalità del fascio di luce per la corretta visione nei punti utili.
Utensili portatili manuali meccanici: martello, cacciaviti, chiavi, sgorbie, pennelli etc	Banco di lavoro o zone diverse in cui è collocato l'artefatto se di dimensioni superiori	Assemblaggio / Disassemblaggio manutenzione, controllo, manipolazione oggetti minuti (viti, bulloni, chiodi) lavorazioni su oggetti	Media: accuratezza nelle attività	Media: acuità visiva dei dettagli	Medio-elevato illuminamento sul piano. Direzionalità del fascio di luce per la corretta visione nei punti utili.

### 5.3 *L'importanza dell'ambiente di lavoro: affordances*

Le azioni dell'uomo avvengono in un determinato ambiente e sono direttamente influenzate dalle variabili dell'ambientali percepite dall'uomo. Secondo James Gibson<sup>36</sup> (1979) l'ambiente è riferito a ciò che l'utente percepisce in modo volontario e in particolare a ciò che l'ambiente gli comunica tramite quelle che definisce "affordances" dell'ambiente, un concetto successivamente rielaborato da Donald Norman nei suoi studi sull'usabilità degli oggetti.

L'affordances degli ambienti dipendono in larga parte da fattori fisici, oggettivi e reali attribuibili allo spazio, ma al contempo dipendono anche da fattori soggettivi e percettivi; questo rapporto dicotomico tra soggettività ed oggettività influenza direttamente il valore ed il significato degli oggetti che possono essere direttamente percepiti nell'ambiente.

Le informazioni che l'uomo deriva dall'ambiente che lo circonda sono di diversi tipi. In particolare viene percepito il layout ovvero la sistemazione degli oggetti nell'ambiente circostante individuando sia la propria posizione relativa ad essi sia comprendendo le affordances comunicate da tali oggetti. Il layout si modifica continuamente in base alla propria posizione e alle caratteristiche che possono essere successivamente visualizzate e comprese degli oggetti stessi. Gli stimoli percepiti sono veicolati da mezzi (medium) come la luce che rende visibile l'ambiente, anche se in alcuni casi determina immagini distorte o illusorie degli oggetti. Si percepiscono gli oggetti nella loro sostanza ovvero si è in grado di capire cosa si può fare con l'oggetto per raggiungere il proprio obiettivo e/o per svolgere l'azione desiderata, inferendo vantaggi, svantaggi. Inoltre la percezione umana è influenzata dalle superfici degli oggetti, ovvero la texture, il colore, la riflettanza, caratteristiche che contribuiscono a dare ulteriori informazioni alla comprensione dell'ambiente nella sua interezza e nei suoi dettagli. A questo si aggiungano gli eventi che contribuiscono a modificare la percezione di uno spazio nel tempo: essi possono essere casuali, ricorrenti, concomitanti con determinate azioni, reversibili o irreversibili. Gli eventi maggiormente percepiti riguardano il movimento: l'attenzione dell'uomo è spesso attratta dagli elementi in movimento all'interno del campo visivo che determinano spesso disturbo perché distraggono dal focus principale dell'attenzione. Ambienti particolarmente caotici, inquinati sia da un punto di vista visivo che acustico possono risultare in disturbo o di distrazione per il corretto svolgimento del lavoro.

Le attività umane dipendono dunque sia da una corretta progettazione dell'ambiente in cui il lavoro viene svolto sia da una corretta capacità dell'individuo a svolgere il suo lavoro. Per questo motivo, è estremamente importante che il soggetto sia messo in condizione di svolgere le sue attività in maniera ergonomica sia da un punto di vista fisico che cognitivo. Le caratteristiche sensoriali dell'uomo, in particolare quelle legate alla vista determinano le sue capacità di comprendere l'ambiente in cui si sviluppano le attività, discernere i particolari, orientare le azioni e i movimenti con accuratezza e precisione e possono contribuire anche a prendere decisioni per tutte le attività operative. Le capacità visive assicurate dall'illuminazione dell'ambiente di lavoro influiscono direttamente sulle azioni (differenti a seconda del livello di automazione della macchina e della difficoltà del compito visivo svolto) determinandone la riuscita o il fallimento. A questo si aggiungono lo stress, la stanchezza e/o l'alienamento che influiscono sulla conduzione del lavoro e allo stesso tempo sono influenzate da componenti dell'ambiente stesso, in cui, molto importante è l'illuminazione. Un illuminazione localizzata di tipo task, flessibile, modificabile e in grado di aumentare la confidenza con cui si sviluppa una determinata operazione, lavorazione e/o attività è utile a migliorare le prestazioni, limitare gli errori e garantire maggiore sicurezza e comfort.

### 5.4 *Progetto dell'illuminazione degli spazi industriali*

#### 5.4.1 *Overview generale*

La normativa UNI EN 12464-1<sup>37</sup> definisce le prestazioni illuminotecniche che un impianto industriale deve avere in funzione della sua destinazione d'uso. La norma specifica i requisiti di illuminazione per persone, in posti di lavoro in interni, che corrispondono alle esigenze di comfort visivo e di prestazione visiva di persone aventi normale capacità oftalmica (visiva). Sono considerati tutti i compiti visivi abituali, inclusi quelli che

comportano l'utilizzo di attrezzature munite di videoterminali che, nell'ambito industriale, sono ormai correntemente utilizzati. In particolare, la progettazione dell'impianto di illuminazione è considerata come fondamentale per il corretto svolgimento delle attività lavorative degli operatori perché *“influisce sulla capacità visiva, sull'attività, sulla sicurezza e sul benessere delle persone”*. Per questo motivo è di fondamentale importanza analizzare e comprendere il compito visivo nella progettazione di un impianto di illuminazione corretto sia da un punto di vista di comfort visivo sia di risparmio energetico. La normativa, insieme alle guide di pratica (lesna Handbook<sup>38 39</sup>) che descrivono le migliori pratiche progettuali, le problematiche e i requisiti di una progettazione in ambito industriale, sono particolarmente dettagliate nel categorizzare le diverse tipologie di lavoro e di attività nonché i diversi requisiti di illuminazione ambientale per una corretta visione e svolgimento del compito in completo comfort e sicurezza.

Nonostante la varietà delle caratteristiche lavorative, l'illuminazione deve fornire adeguata visibilità in modo che le attività possano essere eseguite in maniera sicura e confortevole, al fine di prevenire eventuali incidenti e rischi fisici. L'illuminazione deve incentivare la visione accurata dei dettagli e la corretta valutazione delle azioni e dei movimenti laddove si effettuino attività in cui la velocità sia tale da determinare tempi limitati per la percezione visiva.

## 5.5 Tipologie di illuminazione

L'illuminazione va *“ritagliata”* sulle attività e sulle tipologie di lavoro svolto, alle caratteristiche degli ambienti e anche alle caratteristiche e necessità dei singoli utenti. In generale, si possono enucleare tre macro-categorie di illuminazione in un contesto industriale:

- **Luce generale diffusa**

ad integrazione della luce naturale presente nel laboratorio e pensata come variabile in base ai ritmi lavorativi e alle attività svolte. Si tratta principalmente di illuminazione diretta down-light o semi-diretta con circa il 10/30% del flusso diretto verso il soffitto dell'ambiente per ridurre il contrasto di luminanza tra gli apparecchi e il surround

- **Luce puntuale localizzata (task lighting)**

Laddove sono presenti compiti visivi difficili, come il controllo e l'ispezione, vi è spesso la necessità di una specifica qualità e quantità di illuminazione che non può essere facilmente ottenuti con metodi di illuminazione generale. Per questo motivo, sono spesso utilizzati apparecchi supplementari per fornire una migliore visibilità in piccole zone, per fornire una certa luminanza o una particolare temperatura di colore o distribuzione spettrale oppure consentire uno speciale puntamento delle fonti di luce per evitare riflessi o produrre ombre in modo da rendere visibili al meglio i dettagli del compito visivo. Si tratta di una tipologia di illuminazione pratica e tecnica che consente di poter essere personalizzata e regolata secondo diversi parametri consentendo la massima interazione con l'illuminazione secondo diversi parametri non solo illuminotecnici ma anche ergonomici come ad esempio consentire di lavorare in maniera più agevole nei diversi piani tridimensionali dello spazio di lavoro. La pianificazione di questa tipologia di illuminazione supplementare necessita di considerare il comfort visivo sia di chi svolge il compito sia di coloro che sono nelle immediate vicinanze. Gli apparecchi devono essere accuratamente schermati per evitare l'abbagliamento per il lavoratore e i suoi vicini. Esistono diverse tipologie di task lighting per il settore industriale: apparecchi direzionali con un flusso concentrato con fasci stretti (narrow) che fanno uso di riflettori e lenti e apparecchi ad alta e media luminanza con superfici uniformemente luminose e uso di diffusori prismatici.

- **Luce portatile**

Ove possibile, gli apparecchi supplementari devono essere montati in modo permanente nella posizione atta a produrre il miglior effetto di illuminazione; braccia girevoli e regolabili forniscono la flessibilità di utilizzo. Allo stesso tempo, apparecchiature portatili possono essere spostate in

prossimità delle macchine e degli oggetti mobili su cui lavorare. Tali apparecchi devono essere meccanicamente ed elettricamente robusti per resistere a possibili cadute e manipolazioni incaute, devono proteggere dal calore eccessivo, devono avere protezioni per evitare scosse elettriche.

Nella maggior parte dei casi, la progettazione dell'impianto di illuminazione in un contesto industriale punta al risparmio energetico, alla riduzione dei costi e quindi anche dei cicli di manutenzione. In tal senso si fa largo impiego di illuminazione generale diffusa, penalizzando sia la performance visiva del singolo lavoratore che la sua capacità di modificare la performance luminosa sul suo campo e compito visivo. L'illuminazione focalizzata sul compito visivo per mezzo di una task light è ancora un elemento di illuminazione considerato come aggiuntivo e superfluo. Diversamente è uno strumento utile e particolarmente efficace allo scopo di migliorare le attività lavorative e la sicurezza perché permette una migliore qualità di illuminazione sul compito visivo del singolo, favorendo l'attenzione e la concentrazione, la personalizzazione dell'ambiente luminoso e quindi anche la diminuzione dello stress psico-visivo. L'illuminazione task, sia fissa che portatile, diventa dunque uno strumento, non solo di riconciliazione con lo spazio e il lavoro perché permette all'utente di personalizzarsi l'habitat in cui lavorare ma anche un valido elemento che può incrementare l'efficienza energetica del sistema sia attraverso il controllo manuale che automatico. Utilizzando infatti un sistema di illuminazione task, è possibile ottenere più elevati livelli di illuminamento localizzato che sarebbe oneroso poter raggiungere con la luce generale. Allo stesso tempo, sistemi di accensione e spegnimento automatici tramite sensori possono contribuire a gestire la luce in maniera più efficiente. Questa porzione di relazione, si focalizzerà sull'illuminazione localizzata di tipo fisso o portatile.

## 5.6 Illuminazione localizzata

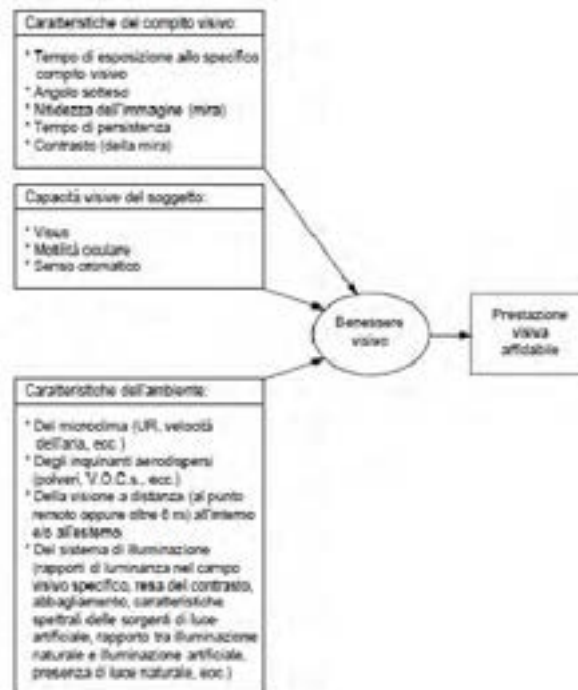
### 5.6.1 Obiettivi generali di progetto

Gli obiettivi del sistema di illuminazione localizzata sono:

- Creare un ambiente luminoso idoneo a soddisfare le esigenze fisiologiche dell'individuo, assicurando, quando possibile, un contributo di illuminazione naturale
- Ottimizzare la percezione delle informazioni visive, con lo scopo di assicurare ai lavoratori le migliori condizioni di lavoro possibile

In alcune situazioni l'assenza o il ridotto benessere visivo dipende essenzialmente dal compito visivo, piuttosto che da altri fattori: sono i casi in cui si ha una osservazione ravvicinata e protratta, l'uso di mezzi diottrici, un ridotto tempo di mira.

Nello schema della Figura 67<sup>40</sup>, sono riportati i parametri che influenzano la prestazione lavorativa, suddivisi in 3 macro-gruppi (compito visivo-capacità visive del soggetto-caratteristiche dell'ambiente)



**Figura 67 Parametri che influenzano la prestazione lavorativa in un ambiente visivo**

La prestazione visiva è la capacità di rilevazione e l'attitudine a reagire manifestate da un individuo quando i dettagli del compito visivo entrano nel suo campo visivo.

La prestazione visiva dipende da:

- caratteristiche proprie del compito visivo da svolgere (dimensioni, forma, posizione, colore e fattore di riflessione del dettaglio osservato e del fondo)
- condizioni di illuminazione
- Altri fenomeni quali l'abbagliamento, la mancanza di uniformità di illuminazione, la natura della sfondo, la disposizione e organizzazione dello spazio di lavoro.

L'affaticamento del lavoratore può essere l'effetto di un lavoro prolungato in condizioni di illuminazione inappropriata (illuminamento troppo basso, mancanza di uniformità, abbagliamento molesto).

L'affaticamento interessa sia il sistema nervoso centrale, in relazione allo sforzo richiesto per dare una corretta interpretazione di segnali ambigui o non nitidi, sia il sistema muscolare a causa dello sforzo di

mantenere una postura non corretta, dovuta alla necessità di ridurre la distanza dal compito visivo, oppure di essere distratti o peggio infastiditi, dalla presenza di riflessi abbaglianti o comunque fastidiosi.

### 5.7 *Requisiti del sistema di illuminazione localizzato*

Il sistema di illuminazione localizzata dovrà essere progettato e dimensionato in modo tale da:

- Garantire livelli di illuminamento adatto al compito visivo e alle attività specifiche di lavoro sia sui piani di lavoro orizzontali, verticali e obliqui;
- garantire un'illuminazione puntuale per consentire attività localizzate e diminuire stress visivo.
- garantire all'individuo di operare in sicurezza, ovvero assicurare un'adeguata performance luminosa durante le attività potenzialmente più pericolose o caratterizzate da maggiori errori e/o danni;
- Evitare contrasti di luminanza troppo forti tra sfondo e oggetto illuminato;
- Impiegare sorgenti luminose di lunga durata con lento decadimento del flusso luminoso, con particolare attenzione ai problemi di rischio fotobiologico (es. rischio da luce blu)
- Minimizzare l'accumulo di sporcizia, sulle lampade e sulle superfici ottiche: in questo aspetto sarà fondamentale definire il corretto grado di protezione IP che dipenderà in parte anche dalle caratteristiche dell'ambiente di lavoro
- Minimizzare l'invecchiamento prematuro dei componenti ottici e massimizzare la durata delle componenti elettriche attraverso una gestione ottimale delle temperature e del sistema di dissipazione. Per esempio, se l'apparecchio è orientabile dall'operatore, occorre prestare attenzione affinché le parti accessibili non raggiungano temperature pericolose o fastidiose per il lavoratore
- Facilitare la manutenzione (anche degli ausiliari elettrici necessari al funzionamento della sorgente) e in modo particolare la pulizia
- Conformità alla norma UNI EN 60598-1 in modo particolare riferendosi ai requisiti di sicurezza
- Il sistema di illuminazione deve essere progettato in modo da evitare effetti stroboscopici che possono generare situazioni pericolose alterando il moto rotatorio o alternativo della macchine o utensili impiegati dal lavoratore
- La direzionalità del sistema di illuminazione deve consentire la percezione delle forme, appropriata per il compito visivo: questo requisito impone la necessità che il sistema sia progettato e regolabile in modo da non produrre ombre moleste sul compito visivo.
- Il sistema ottico deve essere progettato in modo tale da evitare l'abbagliamento diretto sia del lavoratore nella propria postazione di lavoro sia di altri soggetti nelle arre adiacenti. Per quanto possibile, dovrà essere poi evitato ogni fenomeno di abbagliamento riflesso (che dipenderà soprattutto dalla finitura delle superfici illuminate).
- Se l'apparecchio di illuminazione più idoneo a soddisfare i precedenti requisiti dovesse essere di tipo regolabile, quest'ultimo dovrà risultare stabile nella sua posizione, ma facile da muovere se necessario, in modo particolare quando l'operatore cambia posizione di lavoro, per esempio da seduto a in piedi.
- Il livello di illuminamento fornito dall'apparecchio a luce localizzata dovrà essere sufficientemente elevato e uniforme in modo tale da consentire la percezione dei dettagli del compito visivo in modo sicuro e confortevole.

In generale deve essere previsto un illuminamento mantenuto di almeno 500 lux, con una uniformità minima di 0.7 sull'area del compito visivo. Le aree immediatamente adiacenti devono

- avere un illuminamento medio di 300 lux e uniformità di almeno 0.3<sup>27</sup>. I valori indicati sono da intendersi come massima prestazione dell'apparecchio
- consentire risparmio energetico: a questo scopo, al fine di garantire anche un apprezzabile risparmio energetico il dispositivo dovrebbe essere in grado di poter regolare il proprio flusso luminoso emesso in funzione del tipo di area di installazione, del compito visivo, attività. Una possibile indicazione dei legami tra valori di illuminamento e attività-compiti-tipo di area è riportata nella Figura 68 (UNI EN 10530)
  - garantire variabilità e personalizzazione della performance luminosa in termini di illuminamento sui piani utili e temperatura di colore per adattarla sia al compito visivo che alle capacità specifiche dell'individuo.

Tipo di area, compito o attività	Intervallo di illuminamento lx		
Aree esterne di circolazione e lavoro	20 -	30 -	50
Aree di circolazione, semplice orientamento o brevi visite temporanee	50 -	100 -	150
Locali non usati con continuità per scopi di lavoro	100 -	150 -	200
Compiti con semplici requisiti visivi	200 -	300 -	500
Compiti con requisiti visivi medi	300 -	500 -	750
Compiti con requisiti visivi di precisione	500 -	750 -	1 000
Compiti con requisiti visivi difficili	750 -	1 000 -	1 500
Compiti con requisiti visivi speciali	1 000 -	1 500 -	2 000
Svolgimento di compiti visivi molto precisi			> 2 000

Figura 68 tabella tratta dalla norma UNI EN10530 - Principi di Ergonomia della visione- Sistemi di lavoro e illuminazione

### 5.8 Performance visiva e temperatura di colore

La relazione tra temperatura di colore e illuminamento è stata a lungo studiata e una buona soluzione illuminotecnica prevede la ricerca di un buon compromesso tra efficienza energetica e comfort visivo.

La curva di Kruithof<sup>41</sup> mette in relazione il livello dell'illuminamento con la temperatura correlata di colore al fine di ottenere una scena piacevolmente illuminata per l'osservatore: i soggetti preferiscono bassi valori della temperatura di colore per bassi valori dell'illuminamento, mentre la temperatura di colore tende a crescere al crescere dei valori di illuminamento.

<sup>27</sup> Cfr. con quanto prescritto al paragrafo 4.2 della norma EN 1837:1999+A1 (Settembre 2009) Safety of machinery- Integral lighting of machines. Nel nostro caso i requisiti illuminotecnici sono stati mutuati da quelli previsti l'illuminazione integrata per illuminare entro o presso le macchine stazionarie e mobili, per consentirne l'uso sicuro della macchina e la conduzione efficace dei compiti visivi, sulla macchina stessa e sul campo di lavoro previsto.



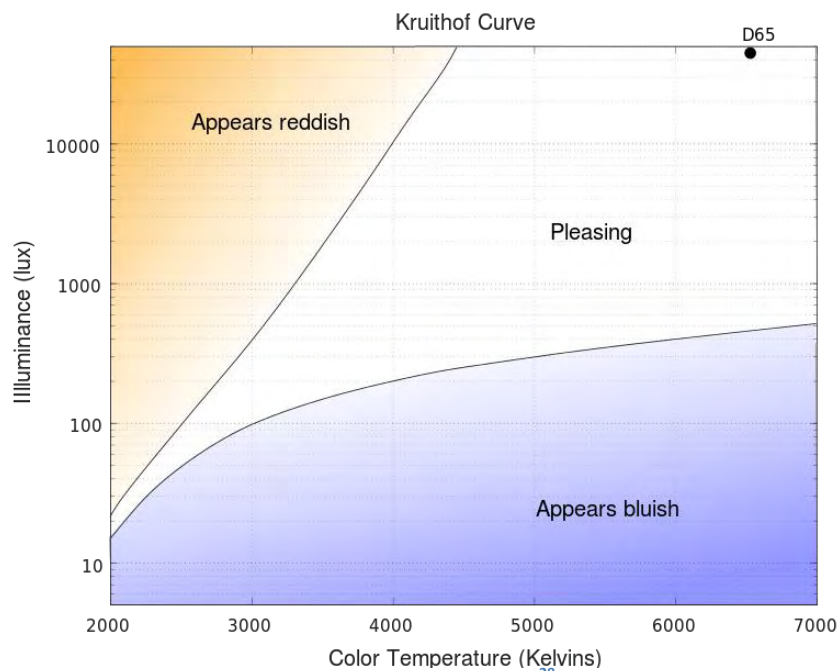


Figura 69 Kruithof Curve<sup>28</sup>

Successivamente, altri ricercatori (Harrington et al<sup>42</sup>) hanno ipotizzato che temperature di colore elevate raggiungono lo stesso livello di brillantezza di sorgenti a minore temperatura di colore, ma con livelli di illuminamento fotopico più bassi.

Sulla base di questi risultati, sono stati introdotti in molte raccomandazioni e guide per l'illuminazione il legame tra temperatura di colore elevata e livelli di illuminamento elevati.

Tuttavia il legame tra temperatura correlata di colore e performance è ben lungi dall'essere delineato con precisione: alcuni studi sostengono che elevate temperature di colore (sorgente a LED con temperatura correlata di colore di 5000 K) producono un miglioramento delle performance visive<sup>43</sup>

Altri studi, condotti recentemente<sup>29</sup> su sorgenti LED, sostengono la tesi che le performance (Low contrast acuity, High contrast acuity, Reading performance) non sono sostanzialmente influenzate dalla temperatura di colore ma principalmente dalla luminanza (contrasto di luminanza), in accordo con studi condotti nei decenni precedenti<sup>44</sup>.

Boyce et al. aveva confrontato l'effetto sulla performance visiva (Landolt C ring task) di due lampade fluorescenti a differente temperatura di colore con moderato indice di resa cromatica e la cui distribuzione spettrale risultava descritta da un indice aggiuntivo dato dal rapporto fotopico/scotopico (3000 K, Ra=78, S/P=1.3 e 6500 K, Ra=72, S/P=2.1). Il risultato fu che la performance visiva dei 79 partecipanti non fosse significativamente influenzata dalla temperatura di colore delle lampade utilizzate e che nella maggior parte dei casi la luce emessa dalla sorgente a 6500 K fosse percepita come più brillante rispetto alla sorgente a 3500 K.

Il principale problema nel trarre delle conclusioni significative dall'esame della letteratura è che risulta molto difficile confrontare l'effetto di sorgenti luminose molto diverse tra loro (si pensi ad esempio allo spettro di una lampada fluorescente rispetto a quello di un LED a conversione di fosforo o un sistema costituito da LED cyan, green, amber, orange, red, one-phosphor cool light and/or two-phosphor warm white LEDs, oppure a sorgenti con notevoli differenze nell'indice di resa cromatica).

Recentemente, si è ipotizzato che la luce potrebbe avere un effetto diretto sulle funzioni cognitive, come ad esempio l'attenzione, la memoria, lo svolgimento di semplici compiti.<sup>45</sup>

La produttività degli impiegati nei luoghi di lavoro aumenta se posti in un ambiente illuminato con sorgenti ad elevata temperatura di colore (17000 K)<sup>46</sup>; inoltre la creazione di un ambiente fortemente luminoso

<sup>28</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Kruithof\\_curve\\_2.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Kruithof_curve_2.svg)

<sup>29</sup> Françoise Viénot, Marie-Lucie Duranda and Elodie Mahler, Kruithof's rule revisited using LED illumination, Journal of Modern Optics Vol. 56, No. 13, 20 July 2009, 1433–1446

(1000 lux) è stato indicato dalla letteratura come capace di ritardare il decadimento cognitivo e la limitazione funzionale tra i soggetti anziani che vivono quegli spazi e di attenuare i sintomi della depressione<sup>47</sup>.

Sulla base di questi argomenti, si è ritenuto utile controllare la temperatura di colore e il livello di illuminamento sul compito visivo, al fine di creare un appropriato ambiente di lavoro<sup>30</sup> e migliorare le performance lavorative.<sup>48</sup>

Si è ritenuto necessario fissare l'intervallo di variabilità della CCT tra 3000 K a 5000 K, garantendo un indice di resa cromatica (Ra) maggiore di 90 per tutte le regolazioni possibili della tonalità della luce. Valori più elevati della temperatura correlata di colore non sono stati presi in considerazione (sebbene il limite del modulo impiegato sia 6500 K) per cautelarsi nei confronti di eventuali problemi di rischio fotobiologico (da luce blu) connessi da una elevata esposizione ad alti livelli di illuminamento prodotti da sorgenti con elevata potenza ottica emessa nella banda del blu.

---

<sup>30</sup> Alcuni ricercatori hanno ipotizzato di sfruttare al meglio gli effetti non visibili della luce, con una opportuna progettazione dell'impianto di illuminazione negli ambienti di lavoro: a tale proposito si veda van Bommel WJM, van den Beld GJ. Lighting for work: a review of visual and biological effects. Light Res Technol 2004;36:255-269.

## 5.9 Ricerca sullo stato dell'arte sull'illuminazione localizzata per il lavoro

### 5.9.1 Prodotti in commercio: illuminazione portatile e fissa

La ricerca sullo stato dell'arte degli apparecchi di illuminazione localizzata per i luoghi di lavoro è stata condotta al fine di comprendere le caratteristiche e i trend rispetto agli apparecchi di illuminazione in commercio in termini di performance luminose, efficienza energetica, caratteristiche meccaniche, offerta tipologica degli apparecchi, costi. In particolare, si è focalizzata l'attenzione su apparecchi a LED (prevalentemente) che avessero due macro caratteristiche:

- **portabilità**, ovvero utilizzabili per il lavoro sia domestico che in officina e/o laboratorio in cui sia necessario trasportare la luce laddove il lavoro di assemblaggio/riparazione/etc venga eseguito;
- **apparecchi da tavolo**, ovvero posizionati staticamente (pur essendo eventualmente riposizionabili) sia su scrivanie di ufficio sia su banchi da lavoro e/o accanto a macchinari di lavoro. In questo caso la flessibilità di utilizzo dell'apparecchio di illuminazione dipende dai gradi di libertà di movimento del suo supporto.



**Figura 70 Schema riassuntivo dei prodotti di illuminazione a LED localizzata per l'ambiente di lavoro attualmente in commercio**

Dall'analisi di mercato effettuata emergono dei trend e delle mancanze che vengono evidenziate nella trattazione perché saranno di seguito rielaborate come requisiti di progetto. In particolare, si evince un

totale passaggio al LED per i prodotti per il task lighting in ambito industriale e più in generale in ambito lavorativo. Questo caratterizza il fattore forma dei prodotti che risultano ridotti nelle dimensioni, ad esempio assottigliandosi negli spessori, riducendosi nella dimensione dei motori di illuminazione. Oltre a questo, la forma dei prodotti si modifica per accogliere questa tecnologia: formalmente riconoscibili nelle loro parti essenziali, le teste di illuminazione presentano in evidenza i dissipatori termici e sistemi ottici propri della tecnologia a LED. Oltre a questo aumenta l'efficienza in relazione alle tecnologie tradizionalmente utilizzate.

Se si considerano **gli apparecchi da tavolo** a partire da quelli tecnici da scrivania di HumanScale fino ad arrivare ai prodotti per ambito industriale di Waldmann Lighting si nota come prevalgano considerazioni di carattere ergonomico e funzionale che si rispecchiano da un punto di vista estetico e soprattutto relativo alle performance luminose. In particolare, le task lighting tecniche da scrivania presentano forme più eleganti ed esteticamente ricercate (ad esempio Horizon) e presentano caratteristiche di illuminazione meno performanti ovvero flussi luminosi ridotti e distribuzioni di fascio molto aperte, temperature di colore calde (3000-3500K) ed elevata resa cromatica (85-90). Diversamente gli apparecchi da banco e da macchinari per ambienti tipicamente industriali volti ad illuminare attività lavorative sia di assemblaggio, controllo, ispezione e lavoro su macchina presentano flussi più elevati con distribuzioni di fascio più controllate (da 10° a 100°) e dipendenti dal tipo di attività, per ottenere livelli di illuminamento sul task molto elevati a temperature di colore più elevate (dai 4000K in su). Questo deriva dalla necessità di ottenere performance attentive da parte degli utenti molto elevate. La resa cromatica in questi casi varia a seconda delle attività lavorative in questione: ad esempio per lavori in cui non è ritenuta utile si hanno rese cromatiche di 75 CRI, mentre per lavori di ispezione e controllo si arriva a 90 CRI. Gli apparecchi per ambito industriale presentano un'estetica molto minimalista e funzione mediante la riduzione completa dei materiali e dei vezzi decorativi: i dettagli formali derivano da ragioni squisitamente ergonomiche di presa, grip e comunicazione di utilizzo dell'oggetto stesso. Oltre a ciò, questi apparecchi presentano diverse possibili configurazioni che garantiscono la flessibilità di utilizzo degli stessi: il motore luminoso infatti è dotato di una serie di accessori di montaggio che determinano un sistema di illuminazione fatto di bracci snodabili o articolati e teste orientabili.

Le efficienze degli apparecchi da scrivania risultano essere più basse rispetto a quelle per ambito prettamente industriale sia perché in questo particolare settore applicativo l'efficienza deve essere controbilanciata dal comfort sia per le caratteristiche dei LED utilizzati (temperatura di colore più bassa e distribuzioni fotometriche lambertiane onde evitare abbagliamenti). L'efficienza degli apparecchi di illuminazione da scrivania varia dai 30 ai 45 lm/w mentre per gli apparecchi di task lighting industriali si arriva a 63 lm/w.

Oltre a questo, particolarmente interessante sono le nuove funzionalità di controllo degli apparecchi di illuminazione a LED che diventano più intelligenti e integrati sia di sensori sia di modalità di interfaccia e controllo semplici ma efficaci. In alcuni casi sono utilizzati sensori di presenza come il PIR insieme al sensore di movimento che individua la presenza di un individuo nei pressi dell'apparecchio e, qualora non rilevi alcun profilo termico e alcun movimento interviene per spegnere l'illuminazione quando inavvertitamente lasciata accesa. In alcuni casi, gli apparecchi sono caratterizzati da livelli e settaggi di scene luminose che possono essere richiamate dall'utente al fine di personalizzare la propria tipologia di illuminazione.

Se si considerano gli **apparecchi portatili**, i generi disponibili sul mercato variano di molto fornendo un'ampia gamma di strumenti che vanno dal gadget con performance luminose estremamente ridotte (ad esempio Striker magnetic LED) al sistema di illuminazione per lavori domestici che completa la gamma degli strumenti elettrici manuali da lavoro (ad esempio Balck & Decker Snakelight) a sistemi più professionali con caratteristiche luminose più performanti (ad esempio Regent di Cooper Lighting LED130 Might D). Rispetto alle performance luminose, particolarmente interessante Hypercoil LED di Kobalt che presenta diverse possibilità di illuminazione e di emissione di flusso (200 lumen full power – 100 lumen low power – 40 lumen modalità lanterna e modalità di segnalazione) e diverse regolazioni del fascio grazie ad una lente

zoom. Questa caratteristica è particolarmente interessante perché permette di concentrare il fascio luminoso senza variare la posizione della testa luminosa.

Rispetto alle caratteristiche formali, in alcuni casi si notano prodotti tipologici completamente nuovi, con forme dimensioni e modalità di utilizzo non realizzabili con tecnologie tradizionali (ad esempio strumenti di illuminazione flessibili come Striker Hand Tool). In generale tutti questi strumenti hanno in comune la possibilità di essere utilizzati lontano da fonti di energia perché dotati di batterie o di sistemi di ricarica che li rendono autonomi e poi facilmente ricaricabili per successivi utilizzi. La maggior parte è dotata di sistemi di aggancio, appiglio e attacco come uncini, corde e magneti che permettono di lavorare in presenza di un'illuminazione sospesa senza con l'ausilio di entrambe le mani. A questo si aggiungano le caratteristiche cromatiche particolarmente vivaci (soprattutto se comparate con i prodotti precedentemente analizzati) e caratterizzanti il prodotto sia da un punto di vista di riconoscibilità del brand sia da un punto di vista di segnalazione di utilizzi e/o funzioni diverse nello stesso strumento.

### 5.10 Il motore luminoso L@W

Il sistema di illuminazione localizzata è stato pensato per svolgere le seguenti funzioni:

#### 5.10.1 Performance di illuminazione: quantità e qualità

- Garantire livelli di illuminazione variabili superiori e/o uguali ai 500 – 1000 Lux
- Ridurre al massimo e/o eliminare completamente le ombre multiple
- Avere una resa cromatica compresa tra 80 e 85 CRI
- Permettere la regolazione dei livelli di illuminazione per aumentare e ridurre il flusso luminoso in relazione ai diversi soggetti e diversi compiti visivi: on/off, dim-on, dim-off
- Variare la distribuzione luminosa aumentando o diminuendo l'angolo del fascio di illuminazione per focalizzare l'attenzione o illuminare una task più ampia: da un angolo narrow (20°) ad un angolo wide (60°) circa.
- Variare la temperatura di colore dai 3000K ai 5/6000K ed eventualmente la distribuzione spettrale emessa in base alla specifica attività di lavoro effettuata. Tale caratteristica è pensata come aggiuntiva rispetto alle altre in specifici contesti in cui sia necessario: ad esempio lavori e attività che necessitano di una corretta visione dei colori, delle trame e degli ordini (tessuti) delle texture dei materiali;

#### 5.10.2 Performance di illuminazione: controllo automatico e controllo manuale

Il sistema di controllo ibrido comprende contemporaneamente la possibilità di controllare l'illuminazione in maniera automatica o manuale. In particolare, il controllo automatico è stato concepito allo scopo di poter modificare l'illuminazione in maniera autonoma rispetto all'utente in relazione all'ambiente circostante e alle condizioni al contorno. Tale sistema di illuminazione digitalizzata permette non solo autonomia di gestione del sistema di illuminazione localizzata in maniera integrata all'illuminazione generale (con ricadute anche dal punto di vista energetico) ma anche capacità del sistema di memorizzare le scene e di creare un database delle prestazioni luminose del sistema stesso. Il sistema automatico dovrebbe essere dunque integrato di una serie di sensori tra cui:

- Sensore di luminosità: integrato sul motore luminoso è in grado di rilevare la quantità di luce naturale e generale e regolarne i livelli di conseguenza.
- Sensore di presenza e movimento: integrato sul motore luminoso o nello spazio è in grado di rilevare la presenza e/o l'assenza di un individuo e poter determinare l'auto spegnimento/accendimento.
- Sensore di tilting: integrato sulla testa del motore luminoso è in grado di rilevarne l'inclinazione in relazione all'ambiente e alla posizione relativa dell'individuo e dimmerarne il flusso luminoso per ridurre l'abbagliamento diretto derivante dalla sorgente.

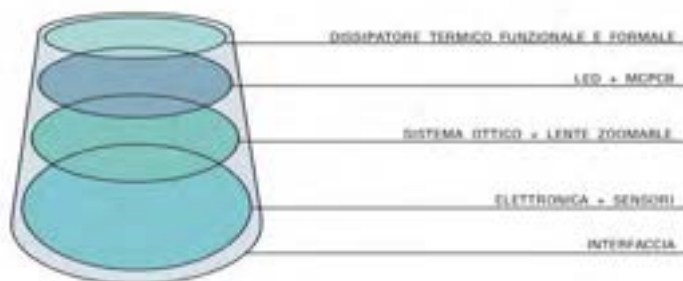
- Sensore actigrafo: indossabile da parte del lavoratore permette il controllo dello stress e dei livelli di concentrazione e /o stanchezza in maniera da rilevare situazioni di particolare pericolo.

Diversamente il sistema di controllo manuale è costituito da:

- Interfaccia tattile capacitiva TUI: integrata sul motore luminoso per la gestione e personalizzazione delle performance luminose di on/off, scene di luce e dimming. Permette il controllo della sola illuminazione localizzata
- Interfaccia tattile SUI: sotto forma di app integrata su tablet smart phone e pannelli di controllo a muro inseriti nello spazio permette di controllare l'illuminazione generale

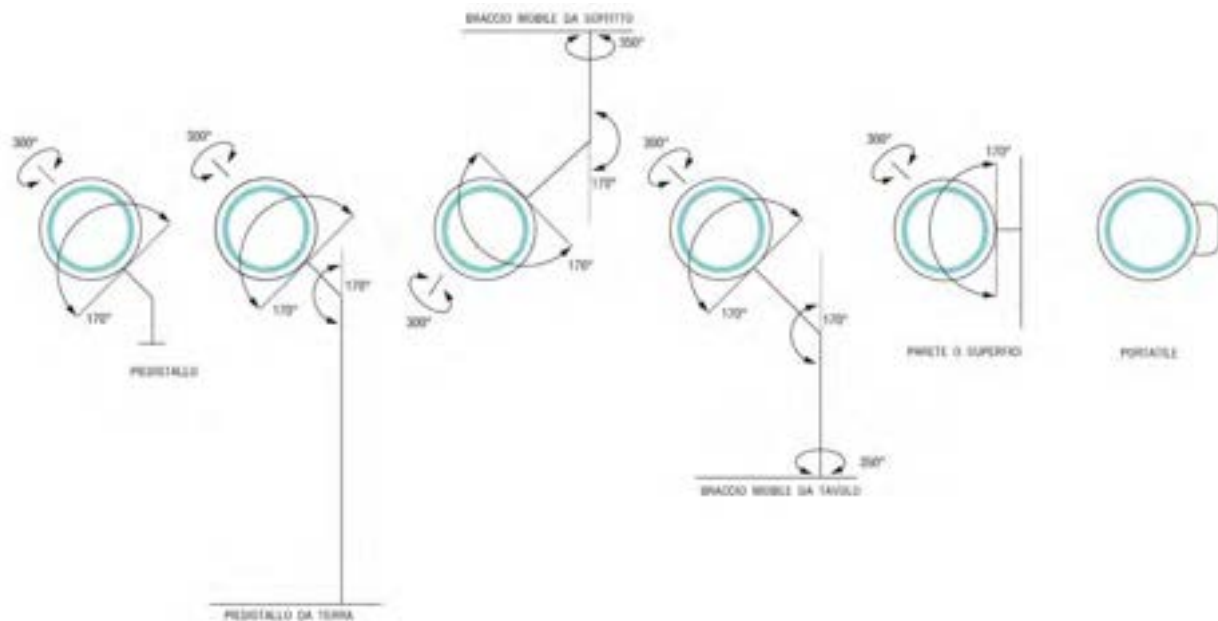
### 5.10.3 Performance di illuminazione: motore luminoso e sistema

Il motore luminoso è pensato come un unicum funzionale in cui avvengono le tre funzioni di performance luminosa e termica e anche di gestione e controllo sia automatico che manuale. Il dissipatore termico assolve alla corretta gestione delle temperature di giunzione e quindi di corretto flusso dei LED e allo stesso tempo è determinante per l'estrazione del calore lontano dal punto in cui si sta lavorando. La geometria del dissipatore deve permettere una corretta manipolazione dell'oggetto evitando ustioni o scottature al lavoratore. L'apparato luminoso è costituito dal LED sul suo circuito stampato (MCPCB) e dalle diverse soluzioni ottiche utili alla miscelazione dello spettro, distribuzione della luce ed eventuale modificabilità degli stessi. Al fine di garantire la gestione e il controllo della performance luminosa, un layer è caratterizzato dall'elettronica di gestione e dai sensori utili agli automatismi del prodotto. Infine, particolarmente importante al fine di gestire in maniera corretta la performance luminosa, il layer relativo all'interfaccia, ovvero il sistema di connessione con l'utente per il controllo e personalizzazione dell'illuminazione.



**Figura 71 Layer funzionali del motore luminoso per l'illuminazione localizzata del settore industriale**

Per consentire la massima flessibilità di utilizzo nei diversi impieghi e campi nel settore lavorativo industriale e nelle diverse configurazioni, il motore luminoso sarà sviluppato come un elemento interfacciabile a diversi supporti e quindi declinabile sotto forma di sistema in modo da poter essere installato sul tavolo o sul banco di lavoro, accanto al macchinario da gestire e operare oppure essere portatile e fissato nel luogo di utilizzo.



**Figura 72 Sistema flessibile di connessione per il motore luminoso**

Il sistema di supporto deve essere in grado di assolvere alla flessibilità e mobilità di gestione della testa luminosa e per questo motivo si tratta di bracci caratterizzati da snodi che permettono movimenti ampi volti ad indirizzare il flusso luminoso laddove è più utile per svolgere il compito visivo. Il design del motore luminoso L@W dovrà dunque tener conto di doversi adattare a diversi supporti e/o braccia snodabili mediante un sistema universale di aggancio. Nel design del motore luminoso questo sarà tenuto in considerazione selezionando uno snodo e un sistema di aggancio disponibile in commercio e più utilizzato. A questo proposito il motore luminoso verrà progettato in modo da essere proporzionato alla presa umana (per una ergonomica manipolazione) e allo stesso tempo abbastanza leggero tale da poter essere connesso in maniera flessibile ai vari diversi supporti.

In relazione all'usabilità generale, il sistema dovrà garantire:

- sicurezza elettrica mediante l'utilizzo di un sistema separato per gli ausiliari elettrici che non sono inseriti a bordo del motore luminoso stesso;
- sicurezza rispetto agli urti mediante l'utilizzo di spigoli arrotondati e di smussi su tutti gli elementi a contatto con la mano dell'utente per evitare eventuali ferite da contatto accidentale con l'oggetto;
- sicurezza termica mediante l'utilizzo di un dissipatore che non presenti calore troppo elevato nelle parti che potrebbero essere a contatto con l'utente. In particolare, l'inserimento di maniglie, pulsanti, manopole e altri elementi che debbano essere manipolati dall'utente dovrà tenere in considerazione non solo le dimensioni ergonomiche delle mani ma anche che la superficie da toccare sia relativamente fredda. Per questo motivo, la parte di dissipazione termica è stata approfondita e sono stati accuratamente progettati accorgimenti riguardanti la grandezza delle alette di dissipazione, l'inserimento di maniglie di presa e di parti atte al contatto diretto con le mani mediante l'utilizzo di materiali isolanti come il silicone (che garantisce anche maggiore grip).

## 5.11 Ricerca sullo stato dell'arte tecnologico

### 5.11.1 Sistemi ottici

Tre sono le principali funzioni che devono essere assolte in modo simultaneo dal progetto del sistema ottico<sup>49 50</sup>:

- Allargare l'area di emissione della luce per ridurre l'abbagliamento
- Controllare l'angolo di emissione del pattern luminoso proiettato
- Raggiungere un'illuminazione il più uniforme possibile dell'area illuminata

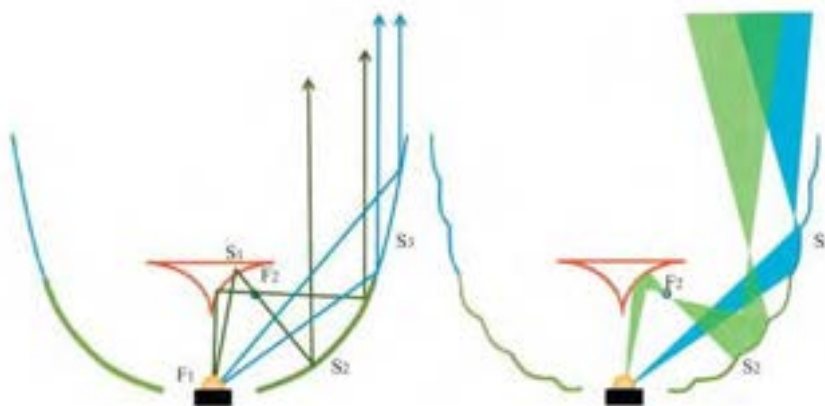
Alcune soluzioni proposte in letteratura<sup>51</sup> prevedono il progetto di un doppio riflettore per prevenire la visione diretta della sorgente LED, contribuendo a ridurre l'abbagliamento dell'apparecchio: il primo riflettore è utilizzato per schermare la sorgente e ridirigere in modo collimato il flusso verso il riflettore primario.

Lo schema proposto è raffigurato alla Figura 73, dove si può osservare la soluzione "confocal" proposta dagli autori dell'articolo citato.



**Figura 73 Esempio di riflettore "confocal" (a destra) e del LED CREE MC-E dynamic white**

Nel dettaglio, la Figura 74 illustra il meccanismo di funzionamento del sistema ottico: i raggi provenienti dal LED incidono direttamente sul riflettore primario (curva parabolica S3 con fuoco in F1, coincidente con la posizione del die del LED) uscendo parallelamente all'asse verticale, oppure incidono sul riflettore secondario (curva ellittica S1, con il primo fuoco posto in F1 e il secondo in F2) in modo tale che siano concentrati in F2, coincidente con il fuoco della parabola S2, il cui fuoco coincide con F2 e il cui vertice è posto al di sotto del punto F1.



**Figura 74 A sinistra è riportata la geometria del doppio riflettore, mentre a destra lo schema di principio del riflettore multi segmento**

Lo schema proposto dovrebbe essere in grado di concentrare il flusso luminoso in un piccolo angolo solido di emissione; tuttavia lo schema proposto potrebbe produrre un pattern illuminato non uniforme, dovuto



ad esempio all'utilizzo di un LED con 4 differenti aree di emissione (per la realizzazione di un sistema con temperatura di colore variabile).

La soluzione proposta dagli autori è stata quella di costruire un riflettore primario (curva S2 e S3) costituito da segmenti multipli con lo scopo di allargare il fascio luminoso incidente all'interno dell'angolo di emissione prescelto e di introdurre un effetto di sfuocatura in modo da ottenere un'immagine proiettata sullo schermo maggiormente uniforme.

La soluzione è illustrata, in linea di principio nella parte destra della Figura 74 e una soluzione commerciale che ricalca questo schema è proposta da Khatod nella serie "Dark Lenses", mostrata alla Figura 75: il dispositivo è adatto a funzionare in combinazione con power LED di diversi costruttori (CREE-LUMILEDS-OSRAM-NICHIA) per realizzare un collimatore da utilizzare all'interno di un sistema di proiezione (in unione a una condenser lens) in modo da ottenere un sistema efficiente e con un pattern proiettato sufficientemente uniforme.

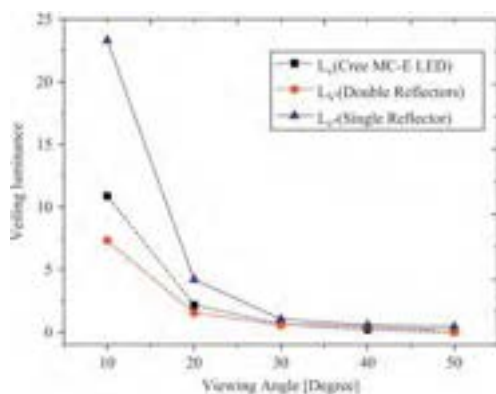


**Figura 75 Kathod Dark Lenses**

L'idea alla base di questo sistema ottico è che la mancata visione diretta della sorgente luminosa, possa contribuire alla riduzione dell'abbagliamento mediante una riduzione della luminanza del sistema ottico.

Per quantificare questo effetto, gli autori hanno misurato la luminanza velante<sup>52</sup> in tre differenti condizioni:

- Solo LED CREE MC-E
- Riflettore singolo che produce un fascio luminoso della medesima apertura
- Riflettore doppio



**Figura 76 Valutazione della luminanza velante per tre differenti design ottici (sinistra) e schema di misura adottato (destra)**

Lo schema di misura che è stato adottato è quello proposto alla Figura 76, dove al posto della pupilla dell'occhio è stato posto il detector per la misura dell'illuminamento: durante la misura il detector è stato traslato in modo tale che fosse possibile misurare il valore dell'illuminamento per diversi valori dell'angolo  $\theta$ , formato tra la normale alla superficie emittente del riflettore e la direzione di osservazione.

L'esame della Figura 76, mostra che il doppio riflettore consente sempre di raggiungere livelli più contenuti di luminanza per valore dell'angolo di osservazione compresi tra 10° e 20°.

### 5.11.2 Lenti a fuoco variabile per illuminazione allo stato solido

Nell'illuminazione industriale, si ha talvolta la necessità di una illuminazione localizzata, con la conseguente necessità di avere a disposizione di fasci luminosi ad apertura variabile: spesso occorre illuminare in maniera più intensa un particolare senza tuttavia poter avvicinare la sorgente luminosa al target in modo da aumentare il livello di illuminamento ottenuto (la task light non deve costituire un ostacolo alla lavorazione e quindi non deve interporre tra l'operatore e il compito visivo).

In questo caso la soluzione migliore consiste nell'impiego di una soluzione ottica capace di variare l'apertura del fascio senza la sostituzione di alcun componente: queste soluzioni sono di solito poco efficienti oppure rischiano di essere molto complesse.

Una soluzione molto semplice consiste nell'allontanare una lente piano convessa dal proprio fuoco, dove è posto il LED, in modo da produrre fasci a differente apertura (aumenta al crescere della distanza tra la sorgente e la faccia piana della lente).

Si tratta di una soluzione molto economica, anche se poco efficiente (Figura 78), adatta ad esempio alla produzione di torce portatili o apparecchi di illuminazione portatili (Figura 77); l'impiego di un solo power LED limita il valore del flusso luminoso ottenibile e per ottenere valori elevati di illuminamento sul piano di lavoro potrebbe essere necessario ricorrere a più LED, con la conseguente possibile introduzione di ombre multiple sul compito visivo.



**Figura 77 Esempio di torcia portatile con zoom: la costruzione del sistema ottico ricalca quanto descritto nel testo**

Un miglioramento della soluzione precedente consiste nel cercare di recuperare parte del flusso luminoso perso nella modalità beam angle, mediante l'utilizzo di un collimatore (lente TIR) o di un riflettore (Figura 80).

Lo schema del sistema ottico è rappresentato alla Figura 79, dove si osserva la diversa posizione della lente piano convessa per realizzare il fascio stretto (in alto) e il fascio largo (in basso): questa soluzione risulta certamente più efficiente della precedente, anche se il flusso complessivamente ottenibile dal sistema ottico è limitato dall'impiego di un solo power LED.

Il principale problema di questa soluzione, che consente di ottenere fasci con angoli compresi tra 9° e 35°, è l'uniformità del pattern proiettato nella modalità wide, che risulta poco uniforme, come mostrato dalla Figura 83: la ricerca dell'uniformità avviene a spese dell'efficienza che passa dal 82% al 72%.

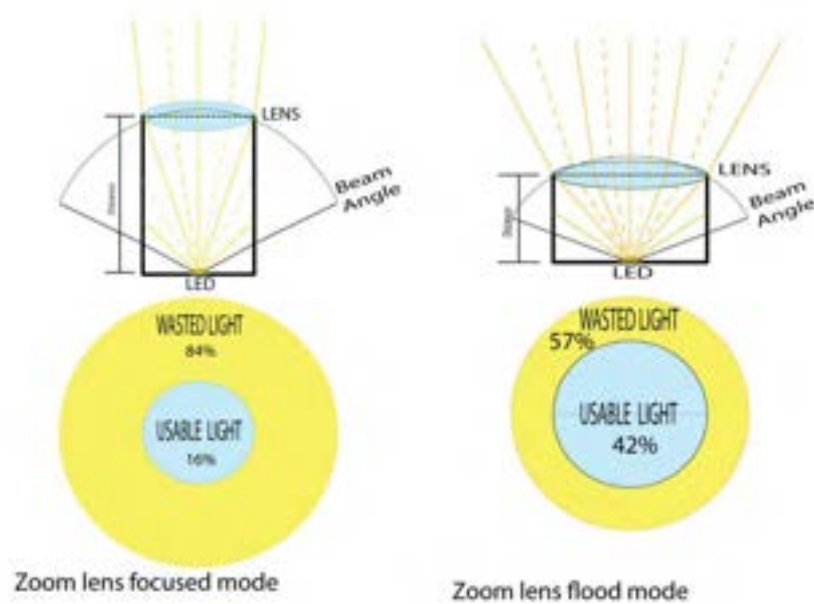


Figura 78 Schema di funzionamento della soluzione a lente singola, nelle due possibili regolazioni “focused mode” e “flood mode”<sup>31</sup>

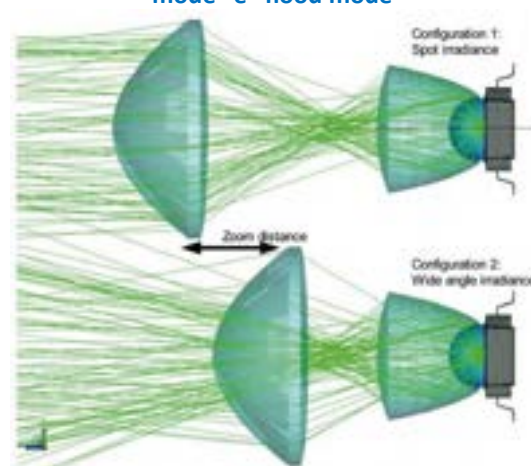


Figura 79 Configurazione zoom con due lenti<sup>32</sup>

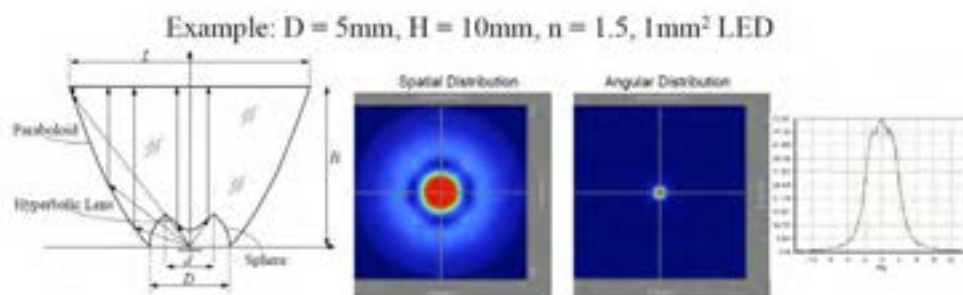


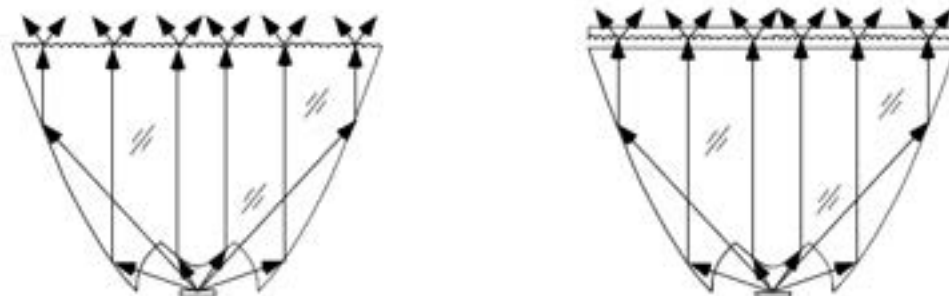
Figura 80 Esempio di collimatore per power LED : a sinistra la geometria del sistema e a destra la simulazione delle prestazioni ottenute<sup>33</sup>

<sup>31</sup> Immagine tratta dal sito : <http://www.extremelights.co.za/zoom-lights-vs-reflector-lights/> con accesso il 23 Marzo 2014

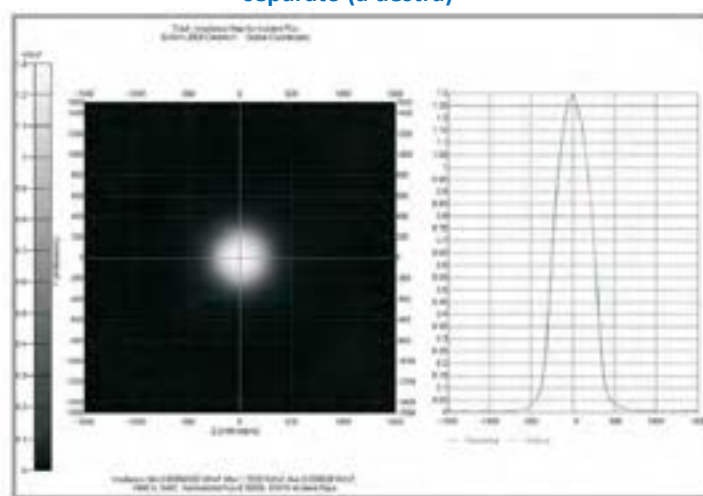
<sup>32</sup> Immagine tratta dalla rivista “Led Professional Review”, Simulation and Optimization of Optical System, Nov/Dec 2008, pag 3, [www.led-professional.com](http://www.led-professional.com)

<sup>33</sup> Adapted from : Donald J. Schertler, Stephen Chakmakjian, Tasso R. M. Sales, G. Michael Morris, LED Luminaire with Controlled Light Distribution, Presented at the SPIE 2006 Annual Meeting San Diego, CA

Per ottenere migliori risultati, spesso la superficie superiore del collimatore viene opportunamente trattata (holographic diffuser) o si aggiunge un diffusore, in modo da migliorare l'immagine proiettata dalla lente secondaria sullo schermo (Figura 81).



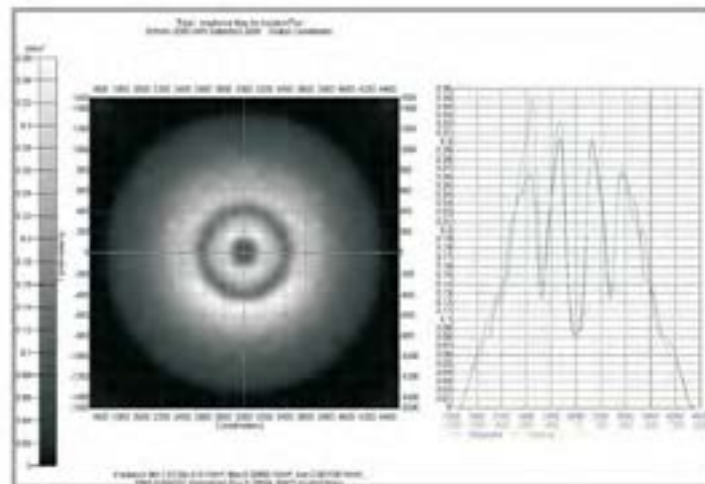
**Figura 81 Il diffusore può essere parte integrante del collimatore (a sinistra) oppure essere un componente separato (a destra)<sup>34</sup>**



**Figura 82 Mappa di irradianza sullo schermo (target), prodotta dal sistema nella configurazione spot. L'efficienza è pari a 72% circa, con un angolo del fascio di 9°.**

La Figura 83 mostra il risultato sullo schermo nella configurazione wide, dove l'efficienza è elevata, ma l'uniformità non è soddisfacente: si osserva infatti un anello nero nella parte centrale e un punto centrale più scuro, come evidenziato dal diagramma cartesiano i valori dell'irradianza nella parte sinistra della stessa figura indicata.

<sup>34</sup> Adapted from : Donald J. Schertler, Stephen Chakmakjian, Tasso R. M. Sales, G. Michael Morris, LED Luminaire with Controlled Light Distribution, Presented at the SPIE 2006 Annual Meeting San Diego, CA

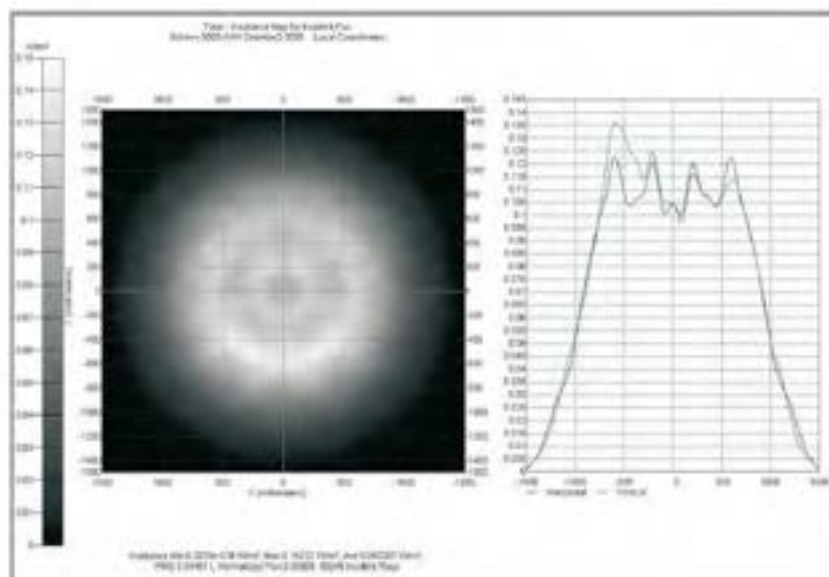


**Figura 83** Mappa di irradianza sullo schermo, prodotta dal sistema nella configurazione wide, prima dell'ottimizzazione<sup>35</sup>.

Al termine del processo di ottimizzazione del sistema ottico, si ottiene la distribuzione riportata nella Figura 84, dove si osserva una migliore distribuzione dei valori di irradianza sullo schermo, come evidenziato dal diagramma cartesiano nella figura indicata.

Miglioramenti della soluzione precedente sono possibili a spese di una ulteriore complicazione del sistema ottico (complicazioni di carattere meccanico, aumento del numero di lenti, modifica della geometria della lente secondaria), con il conseguente aggravio sui costi del prodotto.

Sul principio descritto sono presenti sul mercato diverse soluzioni che utilizzano un collimatore TIR (con funzione ulteriore di color mixing, nel caso in cui il power LED sia RGB, oppure a bianco dinamico) e di una lente secondaria: un esempio è il prodotto Khatod rappresentato alla Figura 85, che consente di realizzare un sistema ottico zoom con emissione compresa tra 11° e 45°.



**Figura 84** Mappa di irradianza ottimizzata nella configurazione con angolo di emissione di 35°: in questa situazione il valore dell'efficienza luminosa si è ridotto al 78% rispetto a 82% iniziale<sup>36</sup>.

<sup>35</sup> Immagine tratta dalla rivista "Led Professional Review", Simulation and Optimization of Optical System, Nov/Dec 2008, pag 4, [www.led-professional.com](http://www.led-professional.com)

<sup>36</sup> Immagine tratta dalla rivista "Led Professional Review", Simulation and Optimization of Optical System, Nov/Dec 2008, pag 4, [www.led-professional.com](http://www.led-professional.com)



Figura 85 Moving Lenslet Array (MLA) per LED CREE XLAMP MC-E, XM-L, MK-R LEDs (parte alta della figura), da usarsi in combinazione con il collimatore e color mixer rappresentato nella parte bassa dell'immagine (cortesia Khatod)

Le curve isolux generate dal sistema sono rappresentate in Figura 87, per una apertura del fascio di 40°, ponendo l'apparecchio a una distanza di 80 cm dal piano di lavoro e orientando la direzione  $\gamma=0^\circ$  perpendicolarmente al piano utile. La Figura 86, mostra invece le indicatrici di emissione del sistema ottico nei due piani principali,  $C=0-180^\circ$  e  $C=90^\circ-270^\circ$  e il valore di efficienza luminosa pari al 90% circa<sup>37</sup>.

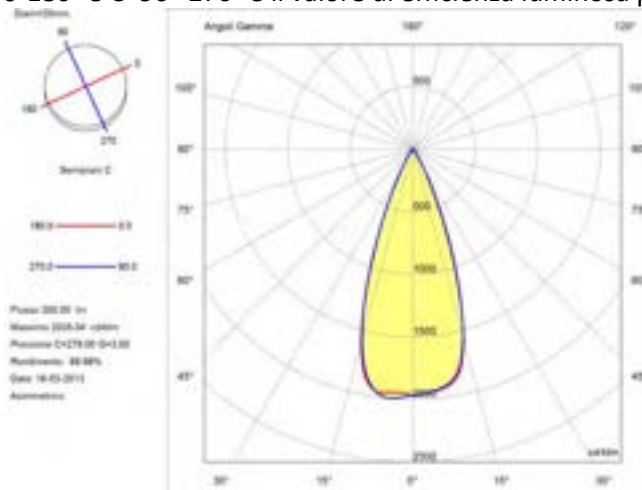
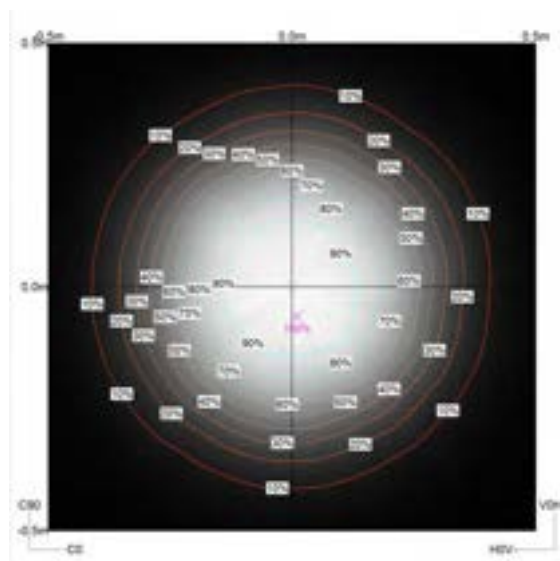


Figura 86 Indicatrici di emissione del sistema zoom variabile Khatod

<sup>37</sup> Le elaborazioni sono state effettuate sulla base dei dati forniti dal costruttore in formato di interscambio \*.LDT mcecreeeulmdat13000000061837274988561708.ltd



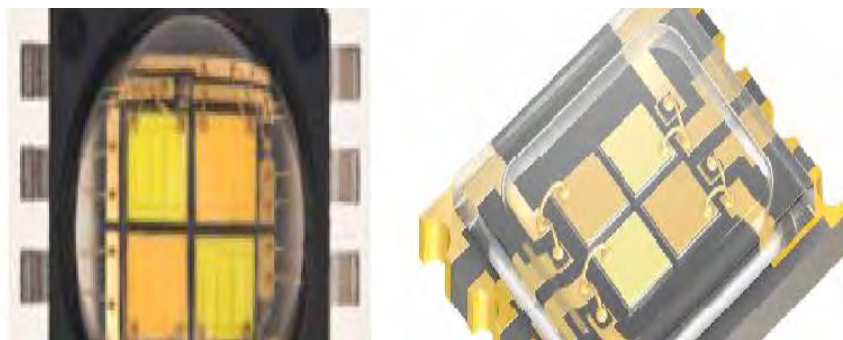
**Figura 87** Curve isolux del sistema zoom variabile Khatod, per una distanza apparecchio-piano utile di 80 cm e apertura del fascio di 40°

### 5.11.3 Array di LED vs modulo /COB

Il principale problema delle soluzioni precedenti riguarda la quantità di flusso ottenibile da un singolo power LED, tenuto conto dell'efficienza di questa tipologia di sorgenti, il requisito di resa cromatica (almeno Ra=80) e infine il contenimento delle dimensioni dell'apparecchio e quindi anche del sistema di dissipazione.

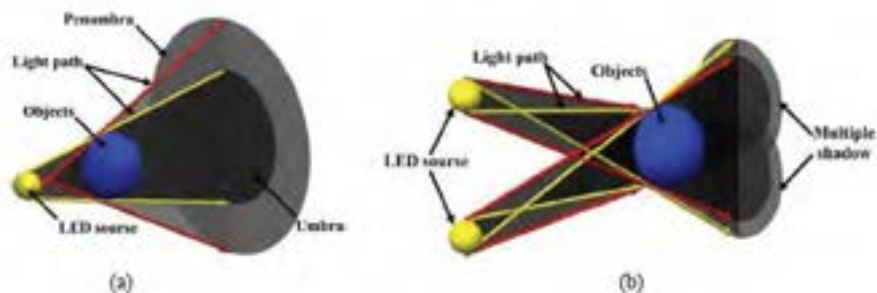
Nel caso si decidesse per un sistema a bianco variabile, le scelte possibili nel caso di power LED, si riducono a pochi costruttori e modelli, tra cui:

- Cree MC-E dynamic white
- Osram Ostar LE CWUW S2W che utilizza due diversi tipi di emettitori  $x = 0.46$ ,  $y = 0.41$  according to CIE 1931 (warm white),  $x = 0.30$ ,  $y = 0.30$  according to CIE 1931 (ultra white)
- Osram Ostar LE ACWUWV S2W che incorpora emettitori amber (617 nm); green (505 nm); warm white ( $x = 0.460$ ,  $y = 0.410$  according to CIE 1931); white ( $x = 0.305$ ,  $y = 0.325$  acc. to CIE 1931)



**Figura 88** A sinistra Cree MC-E Dynamic White e a destra Osram Ostar LE CWUW S2W

Il fenomeno delle ombre multiple risulta molto visibile quando si utilizzano apparecchi di illuminazione con sorgenti multiple e la distanza tra apparecchio e target da illuminare risulta molto ridotta, come nel caso in oggetto.



**Figura 89 Generazioni di ombre nel caso di sorgente singola (a) e nel caso di sorgenti multiple con presenza di ombre multiple sulla superficie illuminata<sup>38</sup>**

L’utilizzo di un solo LED non riesce a garantire un flusso luminoso sufficiente sul compito visivo e da questo la necessità di utilizzare sorgenti luminose multiple per raggiungere l’obiettivo: questo comporta la comparsa di ombre multiple, assai fastidiose nel contesto di utilizzo del prodotto: da questo punto di vista l’utilizzo di una sola sorgente luminosa appare quindi più vantaggioso.



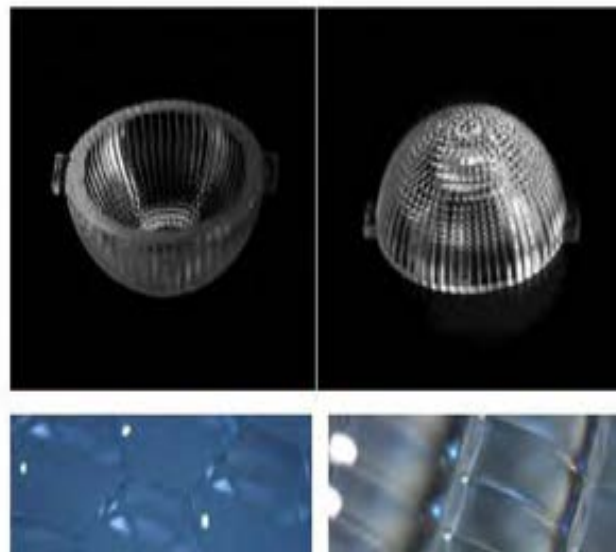
**Figura 90 Effetti indesiderati dovuti all’impiego di un LED multichip (specialmente colorati) all’interno di un apparecchio di illuminazione<sup>53</sup>**

Il sistema più semplice per eliminare gli artefatti dovuti a sorgenti LED multiple, consiste nell’applicare un “diffusore” sulla sommità dei LED: attraverso lo scattering della luce l’emissione di ogni singolo chip vengono miscelate tra loro creando un’emissione luminosa maggiormente uniforme (si riducono ad esempio gli artefatti dovuti a differenti colori).

Infatti, se da un lato le ridotte dimensioni della task light ne aumentano la versatilità e le possibilità di impiego, dall’altro lato la necessità di ottenere un flusso molto elevato (circa 1200 lm su compito visivo) portano con se l’esigenza di un sistema di dissipazione molto efficiente e inevitabilmente ingombrante.

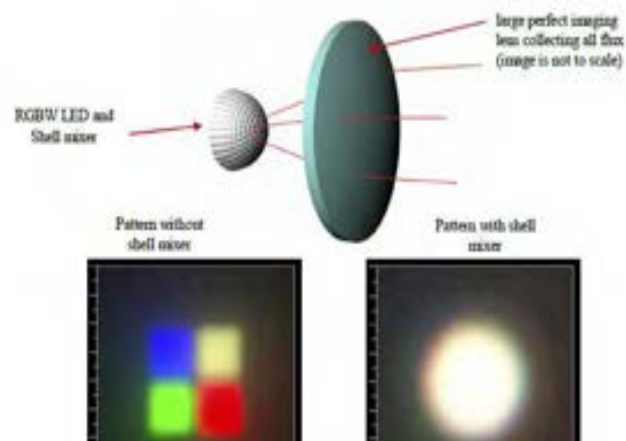
<sup>38</sup> Immagine tratta da: Chao-Hui Kuoa, Wen-Hong Wua, Wen-Tse Hsiaoa, Kuo-Cheng Huang, “ The Multi-shadow Analysis of LED Secondary Optics”, Physics Procedia 19 (2011) 233–238





**Figura 91** Dettaglio del color mixer per power LED RGBW: in basso a sinistra la geometria del profilo esterno della lente al centro, in basso a destra il profilo della lente esterna ai bordi

In letteratura sono descritti molti diffusori per la miscelazione di power LED RGBW (Figura 91), come quelli considerati quali possibili candidati per la realizzazione del progetto<sup>54</sup>.



**Figura 92** A sinistra immagine di campo lontano del LED (CREE MCE RGBW) prodotta su uno schermo dalla lente e a destra l'immagine di campo lontano prodotta dallo stesso sistema ottico con l'aggiunta del miscelatore

Un ulteriore requisito del miscelatore è quello di poter essere utilizzato anche in combinazione con sistemi ottici a riflessione, come mostrato alla Figura 93<sup>55</sup>.

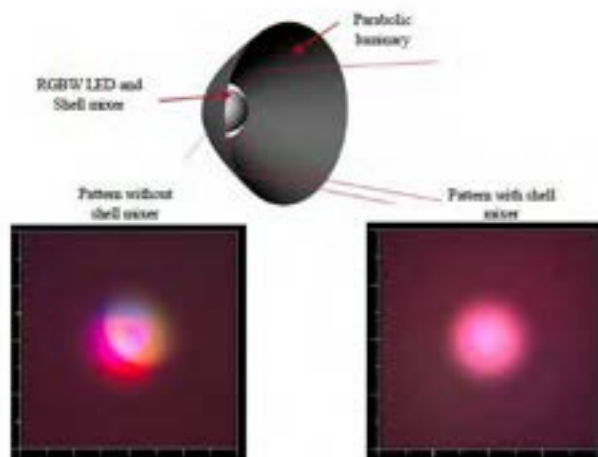
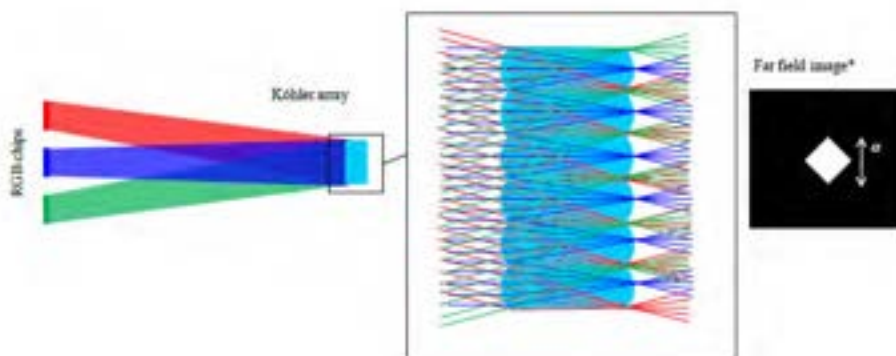


Figure 93 - Top: setup for testing the shell mixer using a collimating reflector. Bottom left: colored far-field image of the bare LED produced by the parabolic mirror. Bottom right: same, but with shell mixer on top of the LED. The sensor plane is placed 2.5m away from the luminaire exit plane.

**Figura 93 A sinistra l’immagine sullo schermo prodotta dal riflettore in assenza del miscelatore , mentre a destra è riportata l’immagine prodotta dal sistema composto da LED RGBW, miscelatore per color mixing, riflettore**

Il miscelatore funziona sul principio dell’integratore di Kohler<sup>39</sup> che può essere utilizzato per produrre una luce bianca attraverso la miscelazione di tra sorgenti colorate (Red,Green,Blue).



**Figura 94 Schema di principio di un integrator lens array per color mixing**

I tre emettitori sono posti in linea, con il blu al centro: la luce proveniente dall’emettitore blu viene focalizzata al centro della lente di uscita ed emessa all’interno di un angolo di apertura predefinito. Immaginando che la geometria delle lenti in figura sia a sezione quadrata, per quanto detto in precedenza il sistema produrrà sul target un quadrato blu. In modo analogo l’emissione rossa verrà focalizzata all’estremo inferiore della lente di uscita ed emessa da quest’ultima all’interno di un’apertura definita e produrrà sullo schermo target un quadrato di luce verde. Lo stesso per il terzo emettitore, con il risultato finale della sovrapposizione di tra quadrati colorati sullo schermo che danno origine a luce bianca.

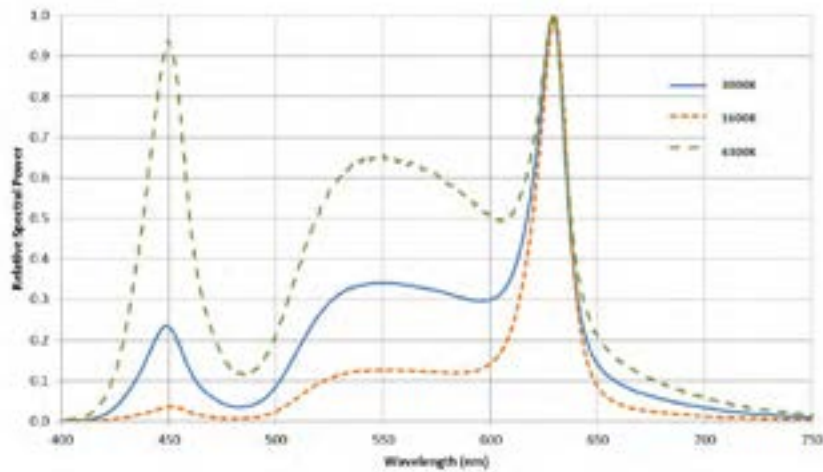
Una valida alternativa all’impiego dei power LED precedenti è offerta da LED ENGIN attraverso un modulo a temperatura di colore variabile, composto da un LED, da una elettronica di controllo, che consente di emulare il comportamento di una lampada a incandescenza (variazione della temperatura correlata di colore tra 1600 K e 3000 K) quando viene regolata in intensità oppure dimming della temperatura correlata di colore (2100 K -4300 K) e dell’intensità possono essere gestiti in modo autonomo.

<sup>39</sup> Nella figura è illustrato il funzionamento della versione piana e lineare



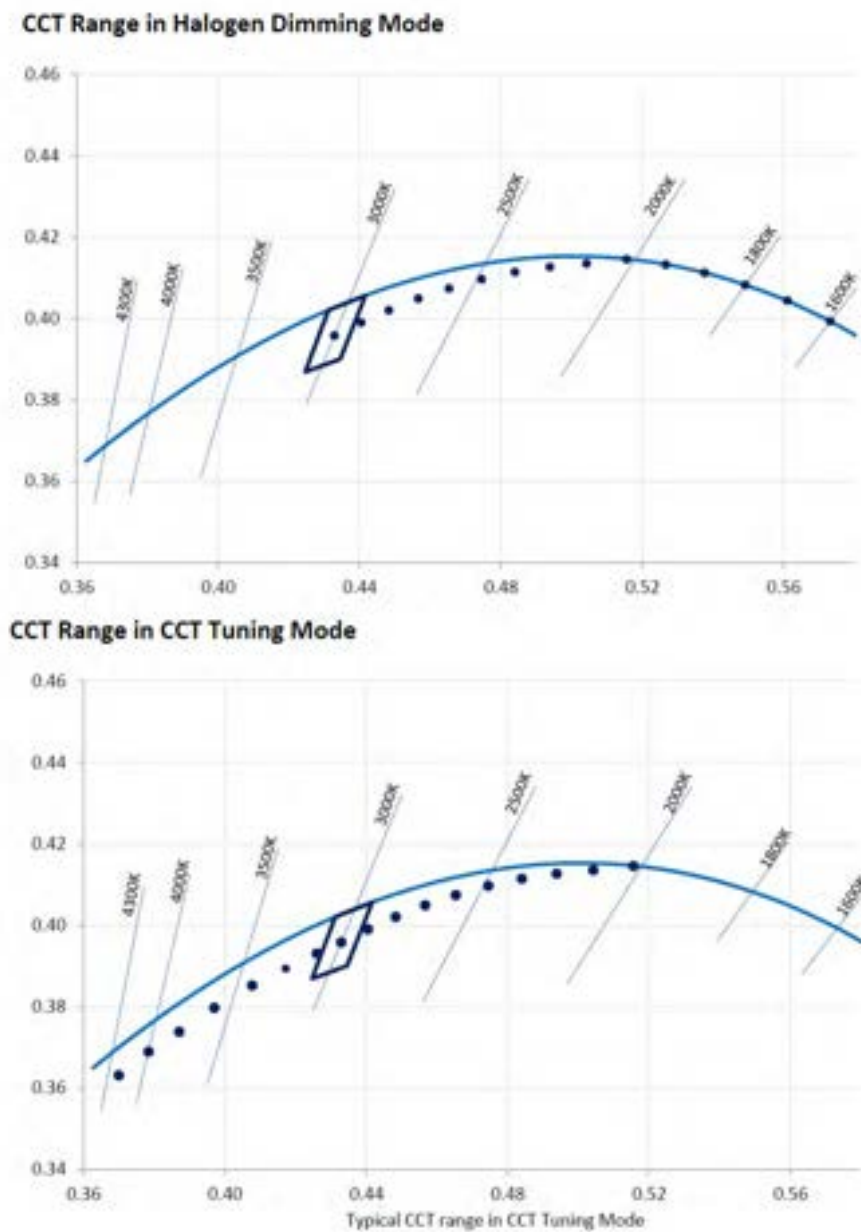
**Figura 95 LEDENGINE LTC-83T1xx-0HD2**

La distribuzione spettrale del dispositivo è riportata alla Figura 96, per tre differenti temperature correlate di colore 1600 K-3000 K- 4300 K.



**Figura 96 Distribuzione spettrale del modulo LEDENGINE per tre differenti temperature correlate di colore 3000K 1600K 4300K, corrispondenti ai limiti di regolazione per ciascuna delle due modalità di funzionamento**

Per quanto riguarda le cromaticità della luce emessa dal modulo, in differenti regolazioni della temperatura di colore, i risultati sono riportati alla Figura 97: si osserva che per bassi valori della temperatura di colore i punti giacciono sul luogo Planckiano, mentre al suo crescere, da 2500 K in avanti, le cromaticità ottenibili dal sistema si spostano al di sotto della curva (indipendentemente dalla modalità di regolazione scelta).



**Figura 97 Cromaticità assunte dal modulo LEDENGINE in funzione della differente modalità di regolazione della temperatura correlata di colore**

Il modulo è disponibile con tre differenti aperture:

- Narrow flood 24°
- Flood 34°
- Wide Flood 45°

Le caratteristiche luminose del modulo sono riportate nella tabella seguente: dall'esame dei risultati si osserva che il valore del flusso luminoso emesso risulta adeguato per l'applicazione (1250 lm) e anche il valore dell'indice di resa cromatica CIE Ra non scende mai al di sotto di 85 indipendentemente dalle condizioni di funzionamento del modulo.

**Table 1 Riepilogo delle caratteristiche luminose del modulo LED ENGIN**

<b>Luminous Flux - Light Engine @ 3000K, 100% Intensity</b>	<b>1100 lm</b>
<b>Luminous Flux - Emitter only @ 3000K, 100% Intensity</b>	1250 lm
<b>Efficiency - Light Engine @ 3000K, 100% intensity, T<sub>c</sub> = 65°C, 24VDC</b>	63 lm/W
<b>Correlated Color Temperature (CCT) ranges</b>	Halogen Dim Mode 3000K - 1600K CCT Tune Mode 2100K - 4300K
<b>Color Rendering Index (CRI)</b>	@ 100% Intensity 90 Typical throughout dimming 85
<b>Color Consistency</b>	3 SDCM
<b>Lifetime (L<sub>70</sub>)</b>	> 70,000 hours

Una alternativa a questo modulo è costituita dal modulo TRIDONIC STARK SLE PREMIUM che è un modulo LED a temperatura di colore variabile tra 2700 K e 6500 K lungo la curva Planckiana, con indice di resa cromatica CIE R<sub>a</sub> maggiore di 90.



**Figura 98 Tridonic Talex Stark SLE Premium**

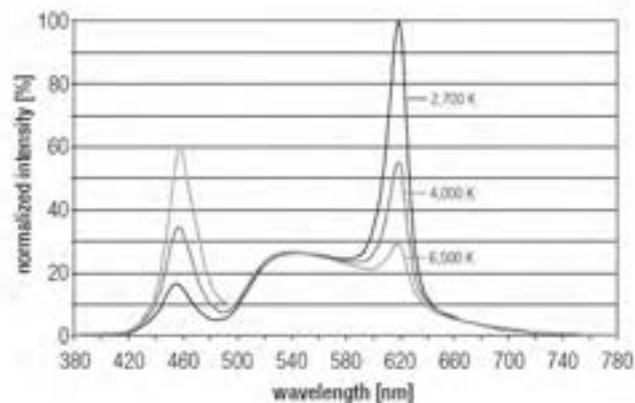
In questo caso la variazione del flusso luminoso emesso risulta indipendente dal particolare valore della temperatura correlata di colore; la distribuzione spettrale normalizzata dichiarata da costruttore per tre differenti temperature di colore è riportata alla Figura 99.

Per quanto riguarda il valore del flusso emesso, il produttore offre la possibilità di scegliere tra due differenti modelli:

- STARK SLE 1400 PRE con un flusso luminoso di 1350 lm<sup>40</sup> e un consumo di 22.5 W<sup>41</sup> e una efficienza luminosa di 61 lm/W con indice di resa cromatica CIE R<sub>a</sub> maggiore di 90
- STARK SLE 2200 PRE con un flusso luminoso di 2050 lm e un consumo di 31.7 W e una efficienza luminosa di 65 lm/W con indice di resa cromatica CIE R<sub>a</sub> maggiore di 90

<sup>40</sup> I valori di flusso luminoso si riferiscono alla temperatura correlata di colore di 2700 K, con modulo operante alla temperatura ambiente di 25°C e temperatura del case tc=65°C. La tolleranza sui dati fotometrici, indicata dal costruttore è pari a ±15%

<sup>41</sup> La tolleranza sui parametri elettrici è indicata dal costruttore pari al ±10%



**Figura 99 Distribuzione spettrale normalizzata per il modulo Tridonic Talex Stark SLE Premium**

Il sistema prevede l'impiego di un alimentatore DALI dedicato.

#### 5.11.4 Diffusori olografici

##### Light Shaping Diffuser (LSD)

I diffusori sono utilizzati in diversi campi applicativi e il loro scopo principale è la redistribuzione della luce su una regione ben definita dello spazio.

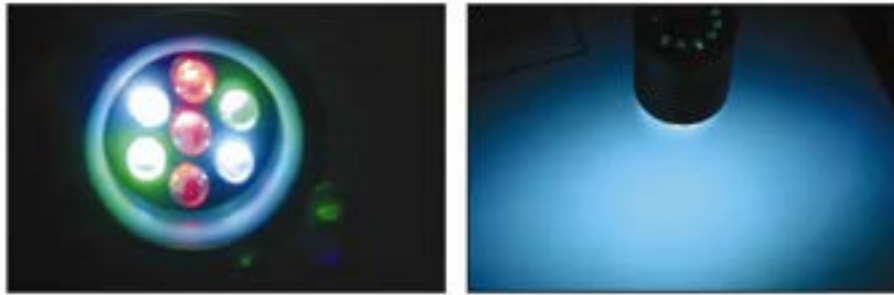
I diffusori sono un esempio di una classe più generale di componenti (beam-shaper) il cui scopo principale è quello di alterare e proiettare un fascio luminoso in ingresso in un intervallo angolare con una determinata distribuzione delle intensità luminose all'interno (Figura 100).



**Figura 100 Beam Shaping e diffusione di una sorgente LED<sup>42</sup>**

Altra possibile applicazione di questo componente ottico è la miscelazione e la simultanea determinazione dell'apertura del fascio di un apparecchio RGB a led, come illustrato alla Figura 101.

<sup>42</sup> Immagine tratta dal seguente articolo : Tasso R.M. Sales, Stephen Chakmakjian, G. Michael Morris and Donald J. Schertler, RPC Photonics Inc., "Light Tamers", Photonics Spectra, June 2004



**Figura 101 Color mixing e beam shaping di un apparecchio a LED (RGB)<sup>43</sup>**

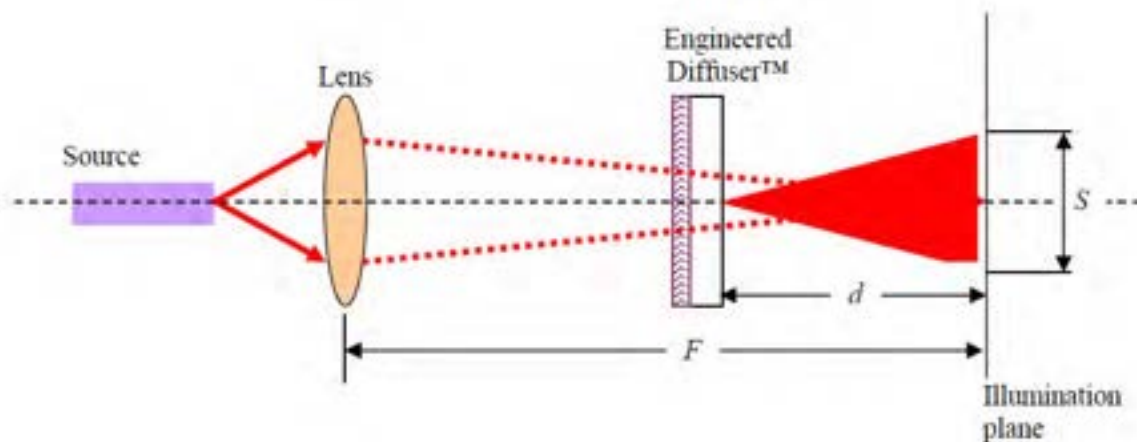
All'interno del progetto, per la realizzazione dei prototipi di studio, sono stati impiegati due differenti tipi di diffusori olografici, entrambi con lo scopo di generare una specifica apertura del fascio luminoso (che risultasse quanto più possibile pulito e netto) prodotto da una sorgente LED e collimato attraverso un riflettore.

I LSD utilizzati sono stati i seguenti:

- L80A6-16 con apertura del fascio a 80°
- L10A6-16 con apertura del fascio a 10°

Al fine di rendere possibile il taglio laser dei diffusori nella forma desiderata, si è scelto come materiale il PMMA.

Lo schema di principio adottato è illustrato alla Figura 102, in cui il fascio emesso dalla sorgente luminosa viene collimato da una lente a una distanza  $F$  (dove si trova lo schermo) e il diffusore è posto tra la lente e lo schermo a una distanza pari a rispetto al piano immagine.



**Figura 102 Schema di principio di un sistema di illuminazione con controllo dell'apertura del fascio e della dimensione dell'immagine luminosa sullo schermo**

La dimensione dell'immagine proiettata risulta pari a:

$$S = d * \tan(\vartheta)$$

Dove con il simbolo  $\theta$  si è l'angolo di semi-apertura del diffusore.

Nello schema illustrato, la regolazione della dimensione dell'immagine sullo schermo è possibile variando la posizione del diffusore (distanza  $d$  dallo schermo).

I diffusori utilizzati nel progetto sono prodotti da LUMINIT e offrono una trasmittanza molto elevata (tra 85% e 92% a seconda dell'angolo di emissione) per una radiazione incidente con potenze distribuite tra 200 nm e 1500 nm e una precisa apertura angolare del fascio.

<sup>43</sup> Immagine tratta dal seguente articolo : Tasso R.M. Sales, Stephen Chakmakjian, G. Michael Morris and Donald J. Schertler, RPC Photonics Inc., "Light Tamers", Photonics Spectra, June 2004

I diffusori olografici, simulano il comportamento di una lente negativa, facendo divergere il fascio luminoso incidente e lavorano al meglio quando ricevono in ingresso una luce collimata, ma possono anche funzionare in combinazione con un fascio luminoso non perfettamente collimato: in questo caso l'apertura effettiva del fascio risulta essere approssimativamente<sup>44</sup>:

$$\text{Effective Angular Output} = \sqrt{(\text{light source angle})^2 + (\text{LSD angle})^2}$$

Nella nostra applicazione, sebbene sia utilizzato un sistema di collimazione del fascio emesso dal LED, il risultato non sarà una perfetta collimazione e quindi la relazione precedente risulta idonea a valutare l'effettiva apertura del fascio uscente dal diffusore olografico.

---

<sup>44</sup> Suggerimento applicativo derivato dal datasheet del costruttore (LUMINIT)



## 5.12 Il progetto L@W: Light at work

### 5.12.1 Schizzi preliminari di progetto

Lo studio del motore luminoso si è concentrato sul sistema di illuminazione a zoom variabile costituito da LED array Luxeon S, lente Carclo (o eventualmente la soluzione alternativa costituita dal riflettore Venla e diffusore olografico a 10° che aumenta di poco le dimensioni del prodotto) e la lente Optotune la cui forma può essere modificata mediante il relativo holder che, attraverso una rotazione manuale consente di modificare l'apertura del fascio. Per quanto riguarda l'interessante soluzione a temperatura di colore variabile e distribuzione di luce variabile studiata attraverso il sistema LED ibrido Tridonic, riflettore Angela e diaframma mobile con diffusore olografico a 80°, ci si è soffermati sull'assessment tecnologico del sistema studiato attraverso un prototipo di studio intermedio (cfr. 6.2.4 Soluzione 4: Modulo LED ibrido Tridonic Talex + Riflettore Angela + Diffusore olografico 80°) senza approfondire, al momento, un design specifico sullo stesso. Infatti, le dimensioni del sistema ottico per una soluzione a temperatura di colore variabile e distribuzione del fascio variabile studiato risultano troppo elevate per poter assicurare il progetto di un elemento di illuminazione da lavoro maneggevole e proporzionato.

La soluzione 01 con zoom variabile selezionata (cfr. Soluzione 01: LED array + Lente Carclo + Lente Optotune) è stata dunque elaborata attraverso tre proposte di motori luminosi con design differente. In particolare nelle diverse proposte sono state approfonditi concept alternativi focalizzati su:

- rendimento ottico del sistema di illuminazione, limitando al massimo le inefficienze interne, mascherando il fascio al fine che risulti definito sul piano di lavoro e che limiti l'abbagliamento da visione diretta dell'ottica;
- dissipazione termica per garantire il corretto funzionamento del LED a regime;
- sicurezza termica per garantire la maneggevolezza del motore luminoso senza scottature da parte dell'utente;
- interfaccia del sistema sia in termini di ergonomia fisica e cognitiva attraverso la definizione di opportune manopole e mapping di comunicazione dei controlli a bordo del motore luminoso;

In aggiunta a questo la progettazione si è concentrata sulle modalità produttive per la realizzazione del prototipo di studio secondo diverse direttive:

- prototipazione dell'oggetto attraverso la semplificazione delle operazioni di costruzione del motore luminoso utilizzando componenti standardizzate come il dissipatore (Proposta 03) e assemblando componenti realizzati ad hoc mediante semplici lavorazioni come ad esempio il taglio laser di pannelli piani;
- prototipazione dell'oggetto attraverso le moderne tecniche di prototipazione rapida quali stereolitografia di materiale plastico come il nylon sinterizzato per il sistema meccanico di movimentazione della lente Optotune e di tutte le parti di interfaccia (manopole e maniglie). Inoltre ci si è focalizzati sulla prototipazione rapida del dissipatore su design specifico attraverso il processo del Metal Part Casting che permette la realizzazione di pezzi unici in lega di alluminio tramite fusione sottovuoto. Si sono studiati diversi dissipatori sia per questioni di corretta e migliorata dissipazione termica sia per la fattibilità tecnica del pezzo mediante questa tecnologia di produzione: a partire da un master in polistirene per geometrie complesse o spessori sottili, il dissipatore viene realizzato mediante una fusione di alluminio con buone caratteristiche di dissipazione al fine di possedere una propria estetica anche funzionale. In questo senso, alcune particolari soluzioni sono state progettate proprio per poter essere realizzate tramite questa tecnologia, senza tener conto dei limiti propri di una produzione seriale tradizionale.

## Proposta 01



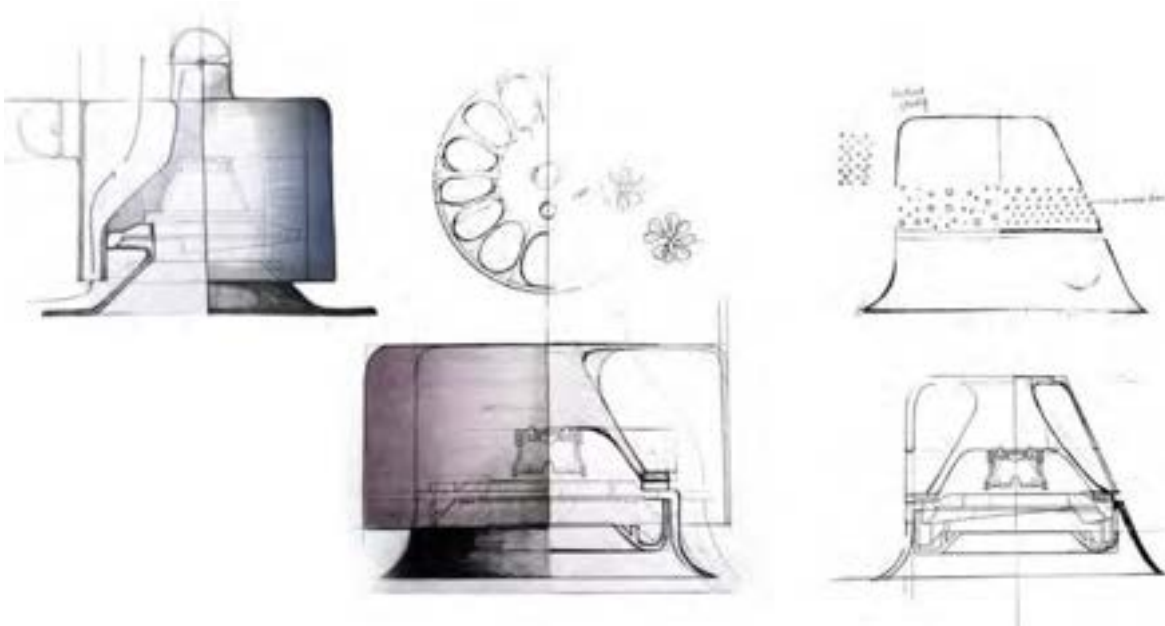
**Figura 103** Schizzi, disegni e modelli preliminari della proposta 01

La prima proposta studiata si è sviluppata intorno al sistema ottico messo a punto in fase di studio (cfr. punto B4) e si è concentrata intorno alla forma del dissipatore, mediante alettature più o meno fitte al fine di massimizzare la superficie per lo scambio termico con l'aria. La forma dell'oggetto è stata studiata per essere più confortevole alla presa, richiamando idealmente la morfologia di una torcia con gli spigoli morbidi. A questo sono state aggiunte delle manopole nella parte posteriore e anteriore per le due diverse funzioni:

- manopola anteriore: zoom dell'ottica e quindi apertura o chiusura del fascio
- manopola posteriore: accensione/spegnimento e dimming.

Dalle soluzioni preliminari (riportate in Figura sulla sinistra) si è proceduto, mediante successive simulazioni e redesign dell'oggetto, a delineare soluzioni particolari dal punto di vista costruttivo che integrano ad esempio una maniglia nel dissipatore stesso o una gabbia che funge al contempo da protezione e da dissipazione termica. Tali soluzioni, non producibili con i sistemi tradizionali, sono interessanti come studi formali di prodotti di illuminazione producibili soltanto tramite prototipazione rapida in cui la forma del dissipatore, oltre ad assicurare il corretto scambio di calore e quindi il corretto regime termico del LED, ha una sua propria estetica propria di una modalità produttiva innovativa.

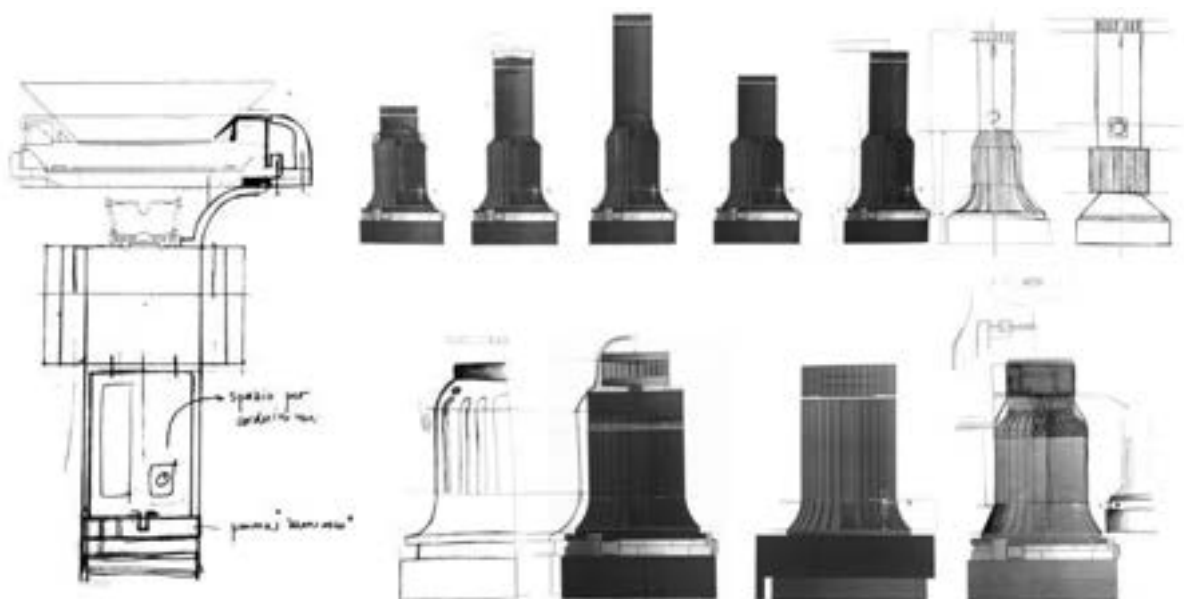
### Proposta 02



**Figura 104** Schizzi e disegni della proposta 02

La proposta 02 scaturisce dalla necessità di migliorare la dissipazione e la sicurezza termica del motore luminoso garantendo una temperatura minore alla giunzione del LED e, allo stesso tempo, proteggendo il sistema di dissipazione alettato dal tocco diretto dell'utente. Per questo motivo, si è ipotizzato il design di un motore luminoso il cui dissipatore richiami formalmente un paralume stilizzato, ridotto nelle dimensioni e molto minimale che possa accelerare l'aria all'interno di una cavità creata appositamente allo scopo di raffreddare il LED, come mostrato dai disegni. In questo caso il dissipatore e la forma esterna dell'apparecchio, oltre ad avere un design specifico ed essere funzionali allo dissipazione possono essere pensati come realizzati in blocco unico sempre mediante tecniche di prototipazione rapida, senza dover sottostare alle problematiche tradizionali degli stampi.

### Proposta 03



**Figura 105** Schizzi, disegni e diverse proposte per la proposta 03

La terza proposta deriva dalla semplificazione del processo costruttivo del prototipo di studio al fine di realizzare un modello funzionante sia dal punto di vista ottico sia termico ma anche esteticamente valido e utilizzabile per esperienze con gli utenti. Per questo motivo sono stati utilizzati componenti in commercio e sistemi ottici precedentemente realizzati per i prototipi misurati con successivi riadattamenti e modifiche (soprattutto nel sistema ottico). Il sistema è stato studiato nell'armonia formale dei diversi componenti e nelle dimensioni finali dell'oggetto affinché, nonostante i limiti imposti dall'utilizzo di parti standard (ad esempio dissipatore e meccanismo di movimentazione della lente Optotune) il motore luminoso finale risultasse comunque proporzionato e maneggevole, funzionale e utile ad essere testato sul campo. Questa proposta formale e funzionale è stata progettata nel dettaglio e costruita in modo tale da ottenere un prototipo di studio preliminare per le successive fasi di progetto.

#### 5.12.2 Proposta 03: Prototipo formale e funzionale

Le fasi di definizione, progettazione e costruzione del prototipo della proposta 03 sono state le seguenti:

1. Definizione del concept di prodotto come precedentemente descritto, dimensionamento del sistema ottico con risoluzione delle criticità; selezione del dissipatore commerciale al fine di contenere le dimensioni e il peso dello stesso e contemporaneamente ottenere una corretta dissipazione termica del LED; dimensionamento del motore luminoso complessivo mediante costruzione di mock-up in cartoncino;

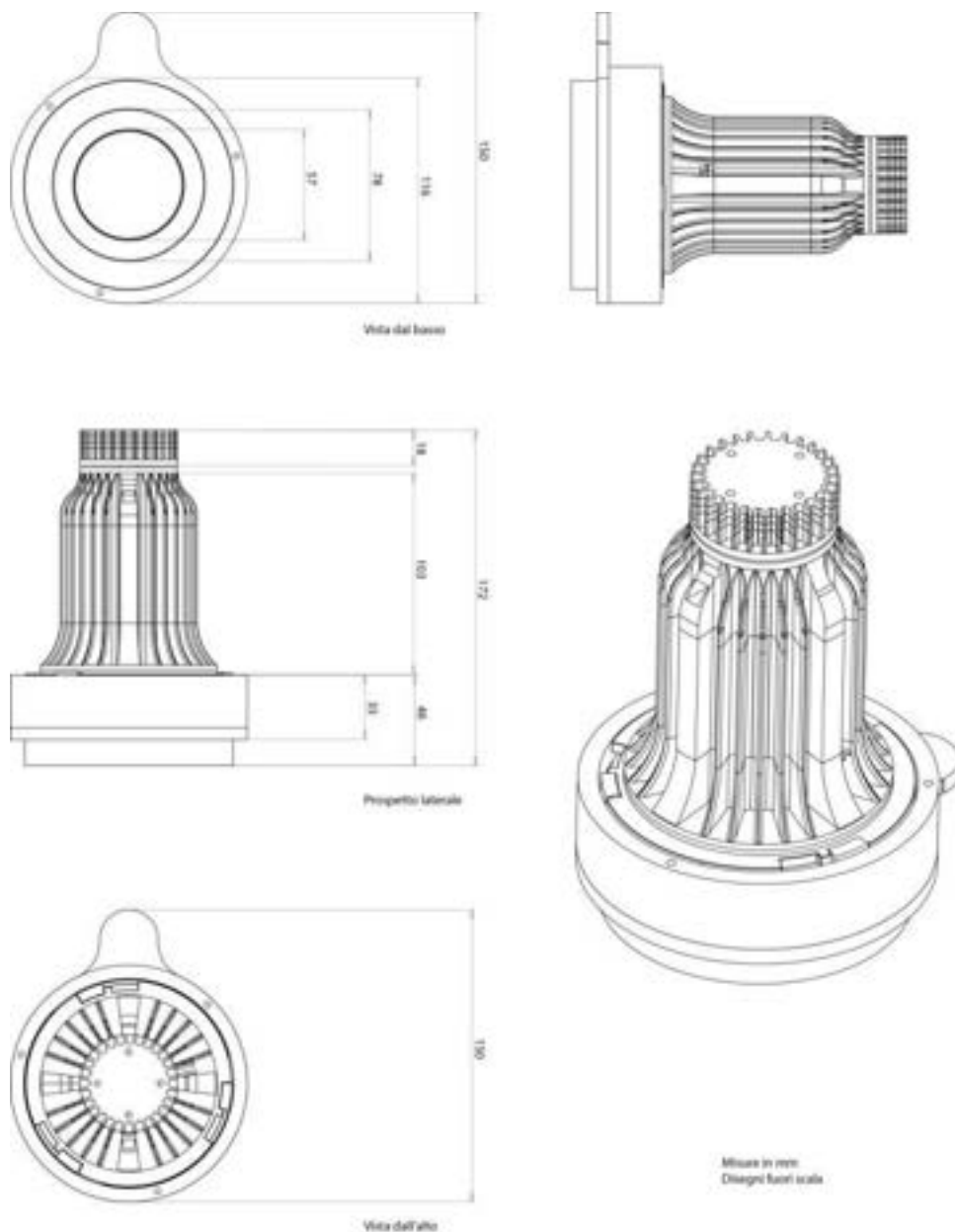


**Figura 106 Dimensionamento formale della proposta 03**

2. Disegno tridimensionale dell'oggetto in tutte le sue parti con specificazione dei dettagli costruttivi avendo selezionato una tecnologia produttiva quale il taglio laser. Il motore luminoso presenta le seguenti dimensioni totali: diametro di 120 mm con inserimento di una manopola (larghezza totale 150 mm) e altezza di 172 mm. (Figura 108)

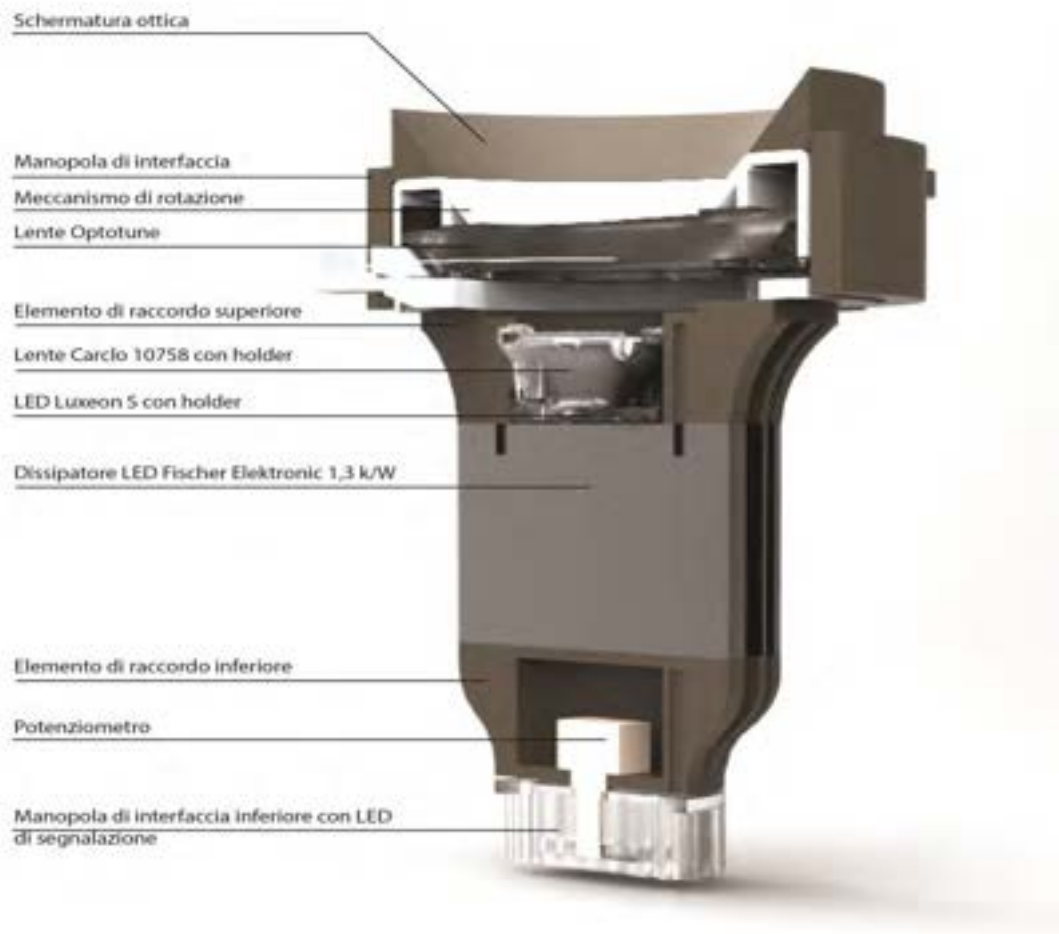


Figura 107 Modello tridimensionale e rendering dell'oggetto



**Figura 108 Dimensionamento del motore luminoso proposta 03**

La Figura 109 mostra i componenti interni del sistema: LED Array Luxeon S con holder per la connessione elettrica e la coesione con il dissipatore, lente Carclo 10758 con relativo holder, lente Optotune e relativo elemento meccanico di movimentazione della stessa realizzato in prototipazione rapida, dissipatore LED 1,3k/W rotondo 70x50mm commerciale di Fisher Elektronik, elemento di raccordo superiore e inferiore con inserimento del potenziometro per il controllo del flusso luminoso, manopola di interfaccia inferiore (con LED di segnalazione) e superiore.



**Figura 109 Sezione del motore luminoso con componenti in evidenza**

3. Realizzazione dei disegni bidimensionali per il taglio laser dei diversi componenti e realizzazione degli stessi presso il laboratorio WeMake di prototipazione rapida del tipo FabLab a Milano. In particolare si è proceduto al taglio di materiale plastico PMMA per le parti diffondenti della manopola e dei pannelli di mdf e/o compensato per le parti formali di giunzione degli elementi, le manopole e i sistemi di mascheratura ottica.



Figura 110 Immagini che mostrano l'attività di prototipazione mediante taglio laser

4. Perfezionamento e montaggio delle parti con completo assemblaggio delle diverse componenti

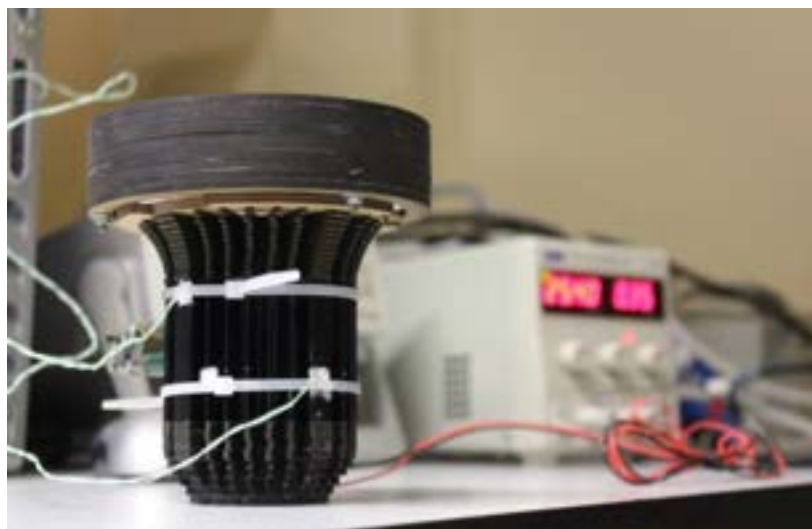


Figura 111 Immagini del prototipo assemblato e in funzione



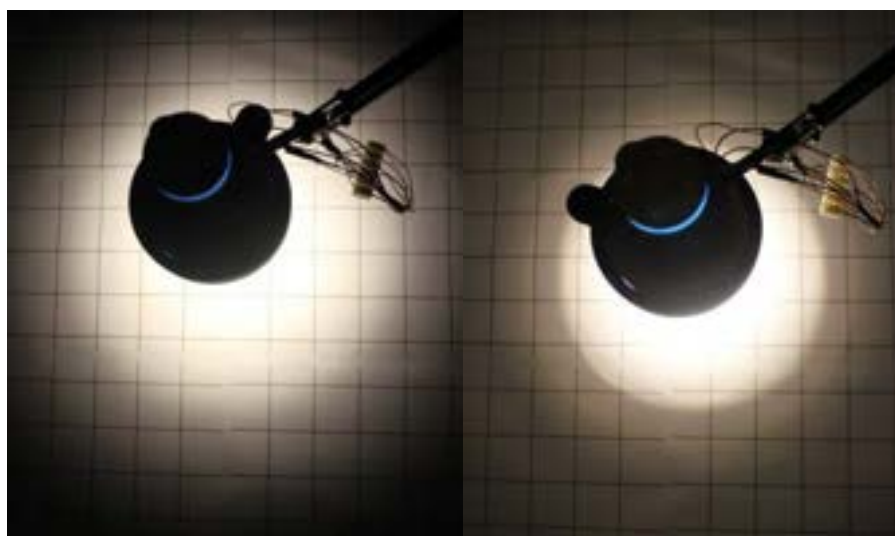
5. Prove di funzionamento dal punto di vista ergonomico, ottico e termico.

In particolare, il prototipo completato è stato misurato per la caratterizzazione termica del dissipatore al fine di testare quale temperatura fosse presente sulla parete esterna che è quella che eventualmente potrebbe entrare a contatto con il corpo umano (mano). Dopo un periodo di stabilizzazione termica durante il quale il prototipo è stato tenuto acceso per il raggiungimento dell'equilibrio termico, sono state misurate le temperature con una serie di sensori di temperatura posizionati sulle alette di dissipazione maggiori. La temperatura rilevata sul corpo del prototipo è di circa 46-47°C: grazie alla presenza di alette molto sottili il prototipo non viene percepito troppo caldo al tatto anche se, nelle parti di dimensione maggiore (alette maggiori) la temperatura percepita è superiore.



**Figura 112 Studio termico effettuato sul dissipatore del prototipo completato**

Il prototipo completato è stato testato al fine di comprendere se il sistema meccanico per la variazione della distribuzione del fascio fosse effettivamente funzionante ed adatto allo scopo.



**Figura 113 Immagine fotografica del prototipo nelle due posizioni: fascio wide e fascio narrow.**

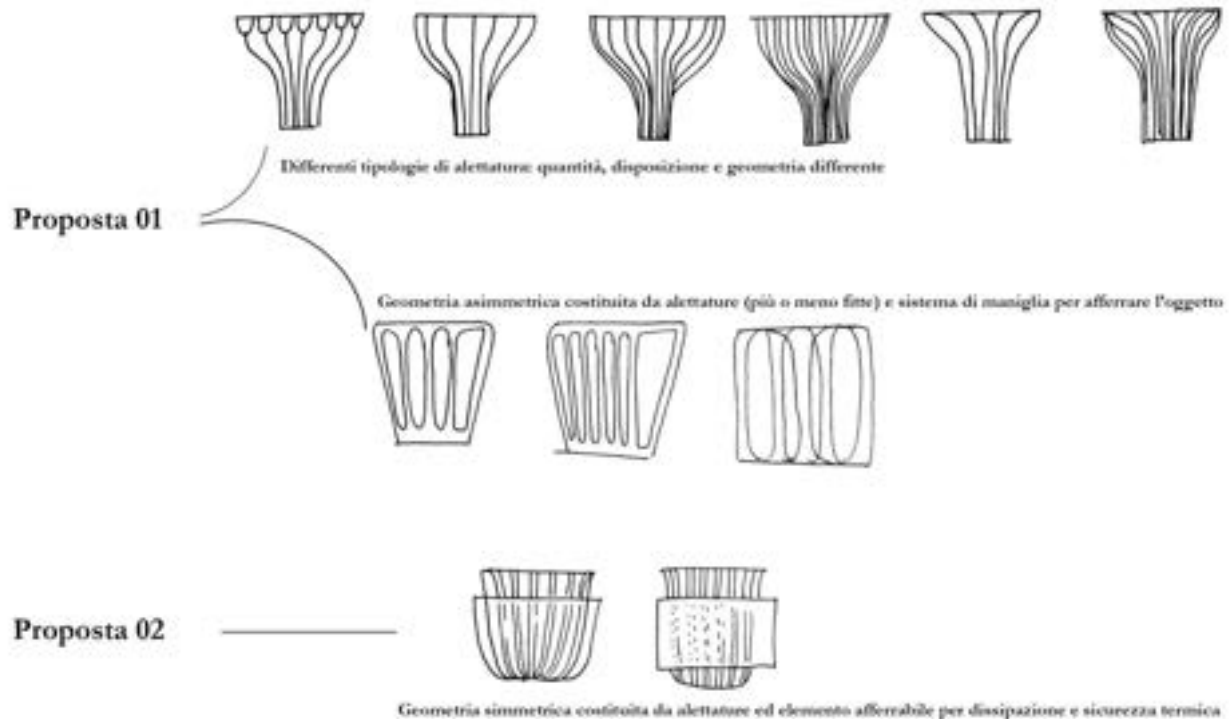
Infine alcune parti dell'interfaccia sono state riportate sul prototipo come il sistema di mapping sulla manopola superiore e il sistema di feedback luminoso per il controllo del flusso nella manopola inferiore.



**Figura 114 Particolari delle manopole con interfaccia e il sistema ottico della Lente Optotune versione narrow**

### 5.12.3 Design del prototipo definitivo: forma e funzione (termica e fotometrica)

Le proposte 01 e 02 precedentemente descritte in fase di concept sono state approfondite mediante un design specifico di soluzioni alternative che sono state geometricamente caratterizzate e testate ciclicamente mediante simulazione termica al fine di verificarne il corretto funzionamento termico e di compararne le prestazioni. In particolare, nel seguente diagramma sono evidenziate le soluzioni utilizzate e le diverse caratteristiche:



**Figura 115** Diagramma che evidenzia le soluzioni di dissipazione progettati per le proposte 01 e 02

### 5.12.4 Proposta 01: soluzioni elaborate e selezionate

Il sistema di illuminazione L@W nella proposta 01 è:

- termicamente dissipato;
- connesso con il sistema di alimentazione esterno;
- maneggevole e provvisto di interfaccia.

Le componenti significative ospitate all'interno del modulo sono le seguenti:

- 1 LED array Luxeon S,
- Sistema ottico con lente Carclo e lente Optotune (entrambe caratterizzate dal proprio holder),
- Sistemi di interfaccia sottoforma di manopole sia superiore che inferiore,
- Potenzimetro di funzionamento per l'accensione/spengimento/dimming,

Data la forma precedentemente identificata (concept proposta 01), si è proceduto ad un dimensionamento del sistema ottico studiato nelle minime dimensioni possibili al fine di ottenere un'illuminazione efficiente e confortevole verso la superficie della scrivania o del tavolo di lavoro ma soprattutto in grado di essere modificata dal punto di vista del controllo del flusso e della distribuzione luminosa. Inoltre, il design si è focalizzato sul sistema di dissipazione a partire, come dimensionamento, da prodotti standard in commercio (ad esempio l'alettatura delle sorgenti a LED retrofit di lampadine ad incandescenza) per raggiungere la desiderata dissipazione termica del motore luminoso. In particolare, la posizione, la grandezza e la quantità delle alette di dissipazione è stata modificata successivamente per ottenere migliori prestazioni dal punto di vista termico, tenendo sempre presente la fattibilità tecnica e l'armonia tra le parti.



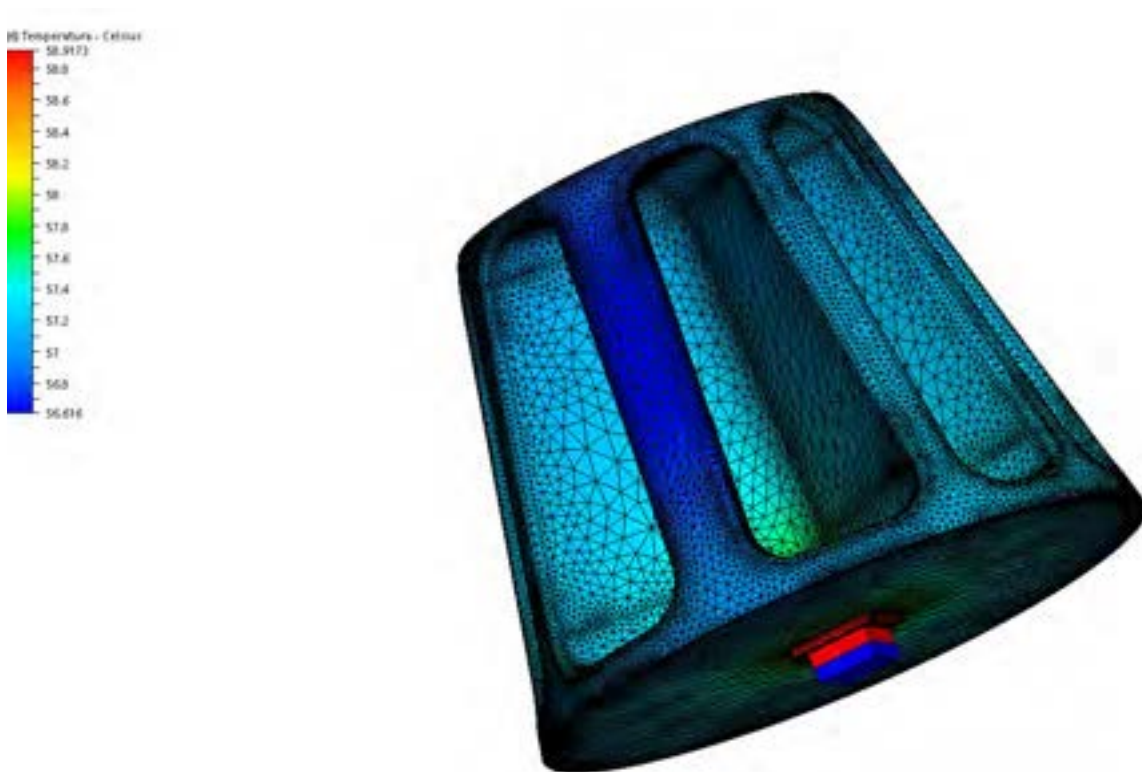
**Figura 116** Immagini di rendering delle diverse soluzioni realizzate (proposta 01): in particolare si notano le diverse alettature del sistema di dissipazione termica

**Tabella 2** Riassunto dei risultati di simulazione per ottenere una panoramica generale dei risultati delle differenti soluzioni progettate.

Proposta 01	Temperatura alla giunzione del LED (Tj) °C	Temperatura del case del LED °C	Temperatura superficie esterna °C
Soluzione 01 (Rosso)	95.3°C	86.1°C	60.5°C
Soluzione 02 (Azzurro)	95.7°C	86.5°C	62.8°C
Soluzione 03 (Giallo)	93.6°C	84.3°C	58.4°C
Soluzione 04 (Arancio)	93.6°C	84.3°C	58.5°C
Soluzione 05 (Grigio)	92.3°C	83°C	57/56 (sulla maniglia)°C
Soluzione 06 (Viola)	92.5 °C	83.2°C	56.5 °C (media)

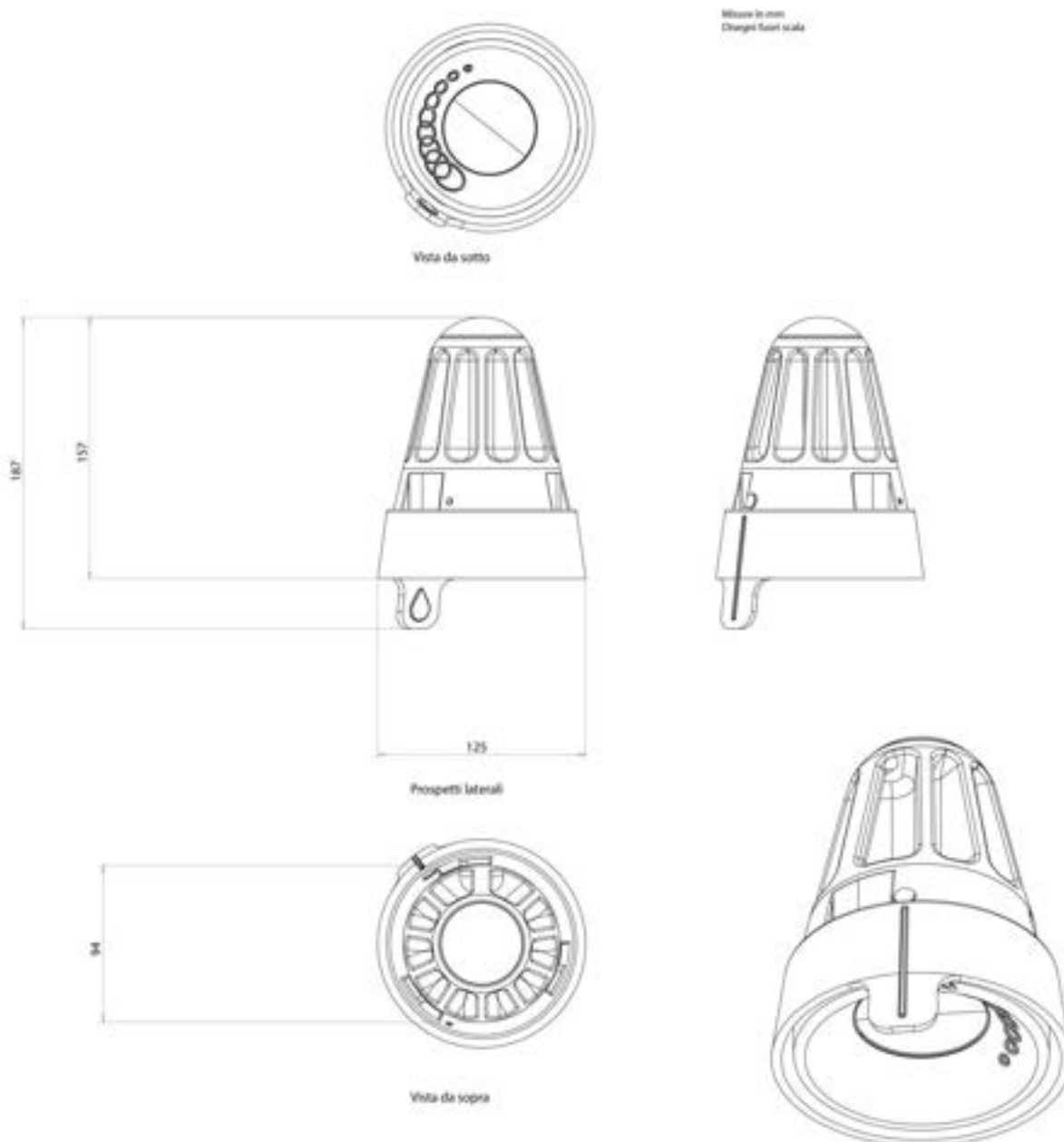
### Dimensioni del sistema selezionato

Nonostante la scarsa capacità di dissipazione dei motori luminosi con dissipatore alettato qualsiasi sia la geometria in termini di quantità e caratteristiche di superficie dissipante delle varie alette, il sistema selezionato della proposta 01 che ottimizza le prestazioni termiche risulta la soluzione 05. Infatti come è possibile osservare dalla simulazione termica realizzata con il software Simulation CFD 2015 la temperatura della giunzione raggiunge i 92.3°C, il corpo dell'apparecchio raggiunge i 56°C medi e la maniglia di presa risulta più fredda.



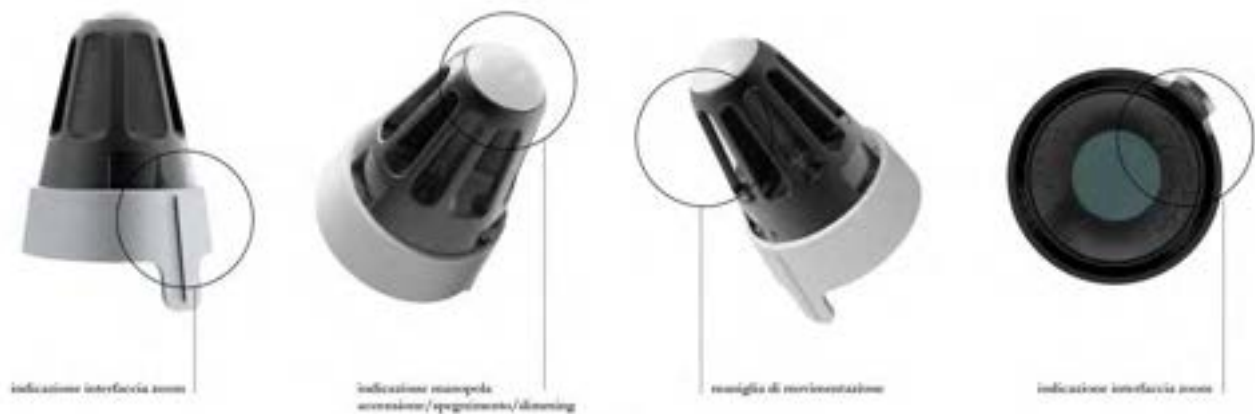
**Figura 117** Simulazione termica della soluzione 05: particolare della distribuzione del calore sul LED e sul dissipatore

Il dimensionamento della geometria, come precedentemente definito, deriva dalla riduzione complessiva di ingombri sia del sistema ottico del LED, lente e lente Optotune con sistema meccanico per lo zoom variabile ma soprattutto del componente di dissipazione che massimizza le prestazioni. Il motore luminoso L@W selezionato garantisce un'illuminazione diretta task che assicura contemporaneamente comfort visivo e la differenziazione della distribuzione luminosa del fascio. Inoltre, la forma particolare del dissipatore che include la presa per la movimentazione della testa luminosa sono le caratteristiche principali di questa soluzione selezionata. Le sue dimensioni complessive sono: diametro massimo di 125 mm e un'altezza di 187 mm.



**Figura 118 Dimensioni di massima del motore luminoso selezionato**

Il motore luminoso è inoltre caratterizzato, come precedentemente descritto da un interfaccia di controllo che permette di carattere grafico che è evidenziata nelle due manopole superiore e inferiore mediante corretto mapping relativo al controllo della distribuzione del fascio luminoso e alla gestione di accensione e spegnimento nonché controllo del flusso luminoso.



**Figura 119 Particolari dell'interfaccia del sistema selezionato per la proposta 01**

### 5.12.5 Proposta 02: soluzioni elaborate e selezionate

La proposta 02 è stata approfondita per massimizzare la dissipazione termica e garantire la sicurezza termica a contatto con le mani del lavoratore che utilizza il motore luminoso in situazioni di lavoro. In particolare due diverse soluzioni sono state progettate e simulate sul software per testare l'effettivo funzionamento del sistema termico proposto.

#### Dissipazione termica

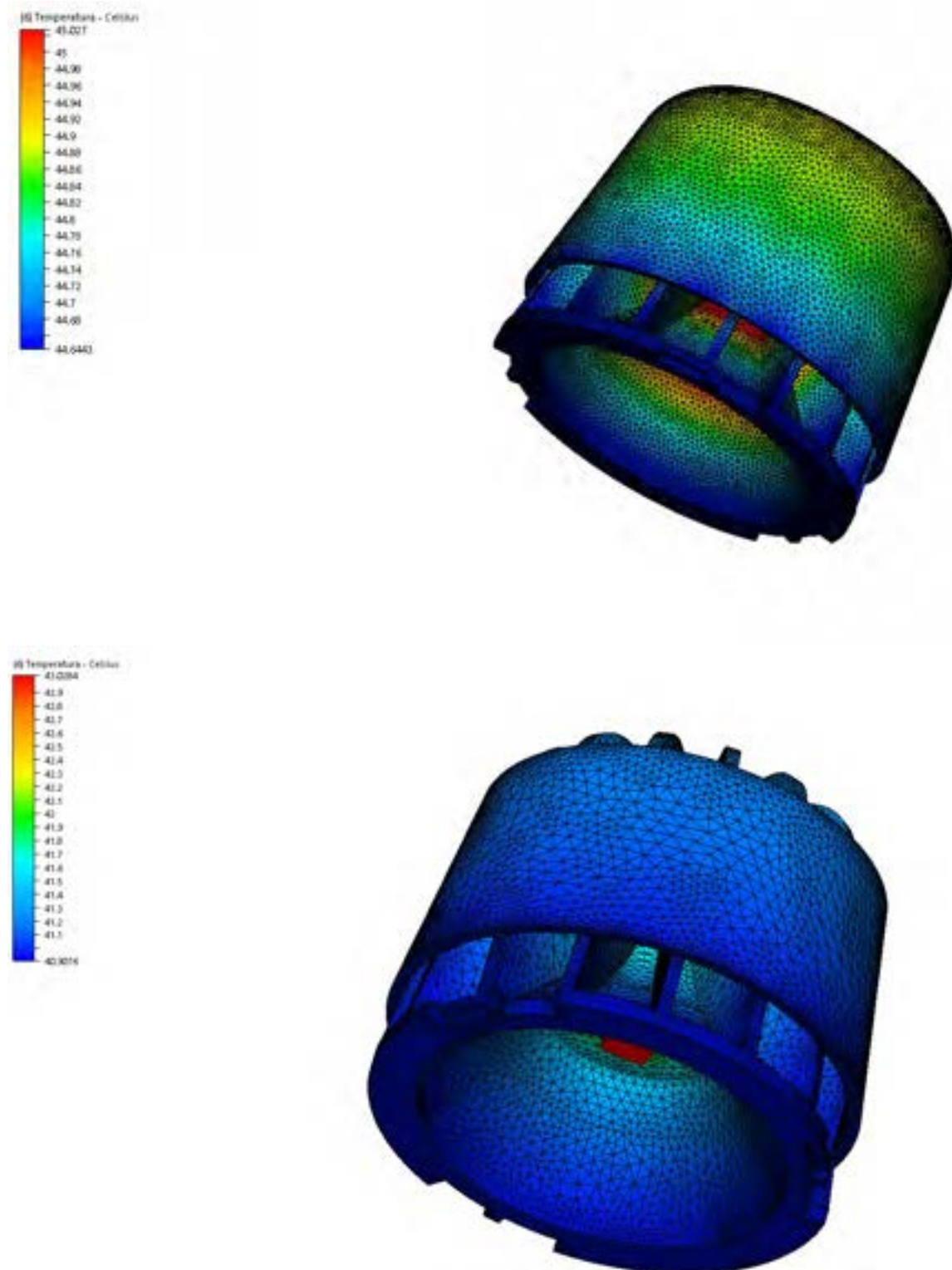
Come da tabella di seguito riportata, le due soluzioni risultano migliorative in termini di dissipazione termica rispetto alla proposta 01 (considerando tutte le soluzioni provate).



**Figura 120 Rendering delle soluzioni per la proposta 02**

**Tabella 3 riassunto delle performance termiche derivate da simulazione delle due soluzioni (proposta 02)**

Proposta 02	Temperatura alla giunzione del LED (Tj)	Temperatura del case del LED	Temperatura superficie esterna
Soluzione 01(Gialla)	80.3 °C	70.9 °C	44°C (media)
Soluzione 02 (Rossa)	76.6°C	67.3°C	41°C (media)



**Figura 121 Simulazioni termiche delle due soluzioni della proposta 02: particolare della distribuzione del calore sul dissipatore di entrambe le soluzioni**

Osservando le immagini relative alla simulazione termica dei due dispositivi si noti come il sistema risulta più freddo dal momento che la cavità ricavata tra le alette e il guscio esterno in alluminio permette di velocizzare l'aria e quindi di favorire il raffreddamento. Per garantire ulteriore sicurezza termica nel contatto tra motore luminoso e uomo si è inserito un elemento in silicone che ricopre parte dell'elemento per garantire anche una migliore presa (grip).



### Dimensioni del sistema selezionato

Il motore luminoso L@W della proposta 02 selezionata garantisce un'illuminazione diretta task che assicura contemporaneamente comfort visivo e la differenziazione della distribuzione luminosa del fascio. Inoltre, la forma particolare del dissipatore che considera il contatto con la mano per la movimentazione della testa luminosa mediante apposizione di un interfaccia in silicone che ne aumenta il grip e riduce il calore sono le caratteristiche principali di questa soluzione selezionata. Le sue dimensioni complessive sono: diametro massimo di 125 mm e un'altezza di 152 mm.

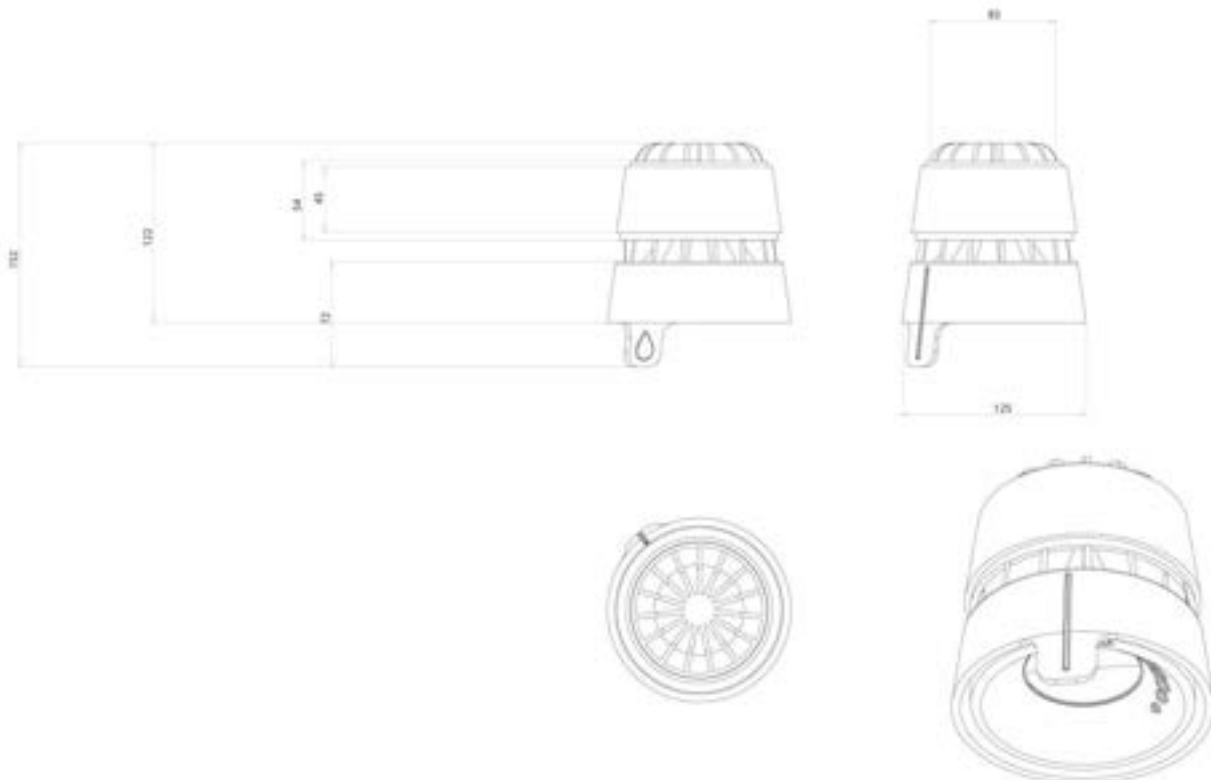


Figura 122 Dimensionamento di massima della soluzione 02 proposta02



Figura 123 Dettagli del sistema di interfaccia della soluzione selezionata (proposta 20)

## 6 Capitolo B.4 Realizzazione di un prototipo esclusivamente funzionale dal punto di vista ottico-fotometrico ed elettrico e misure e nell'esame dei risultati di misura fotometrica e colorimetrica su tale prototipo.

### 6.1 Introduzione

La presente relazione si focalizza sulla misure di verifica fotometrica e colorimetrica di una serie di prototipi di studio realizzati presso il Laboratorio Luce e propedeutici alla fase di design vero e proprio. In particolare, dato lo scopo di realizzare un motore luminoso per task lighting industriale con caratteristiche di maneggevolezza, variazione della distribuzione luminosa ed eventualmente della temperatura di colore, lo studio è stato sviluppato intorno a quattro diverse soluzioni tecnologiche di partenza individuate nella fase di stato dell'arte. In particolare tali soluzioni (Figura 124) sono:

- Soluzione 01: LED array + Lente Carclo + Lente Optotune
- Soluzione 02: LED COB + Lente di Fresnel Khatod
- Soluzione 03: LED Array + Riflettore Venla + Diffusore Olografico (10°) + Lente Optotune
- Soluzione 04: Modulo LED ibrido Tridonic Talex + Riflettore Angela + Diffusore olografico 80°



Figura 124 L'immagine rappresenta i prototipi di studio delle diverse soluzioni sviluppate: Soluzione 01-02-03-04

La fase di preparazione a questa attività è stata quella di progettare tali soluzioni al fine di poter realizzare prototipi in Laboratorio in maniera veloce tali da poter essere successivamente validati attraverso misure fotometriche. Per fare ciò, oltre al recupero di dispositivi ottici standard (ad esempio, lenti, riflettori e sistemi ottici) e di sistemi di dissipazione termica, sono stati realizzati dei componenti di supporto utili sia all'assemblaggio funzionale delle parti, sia al funzionamento ottico degli elementi in movimento (ad esempio mediante prototipazione rapida di holder per le lenti utilizzando tecniche di stereolitografia e taglio laser)

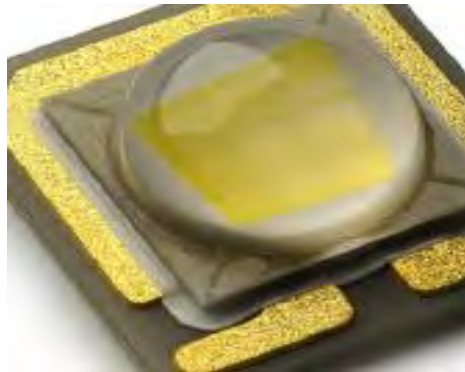
La fase di misura vera e propria, i cui risultati sono descritti nella presente relazione sono state, da un lato, utili alla caratterizzazione e al controllo ottico delle diverse soluzioni, evidenziando problemi e criticità nelle fasi preliminari di elaborazione del design, sia funzionali alla comparazione di vantaggi e svantaggi delle diverse soluzioni per una selezione della soluzione più indicata per lo sviluppo di un prototipo avanzato.

## 6.2 Misure fotometriche su prototipi di studio

### 6.2.1 Soluzione 01: LED array + Lente Carclo + Lente Optotune

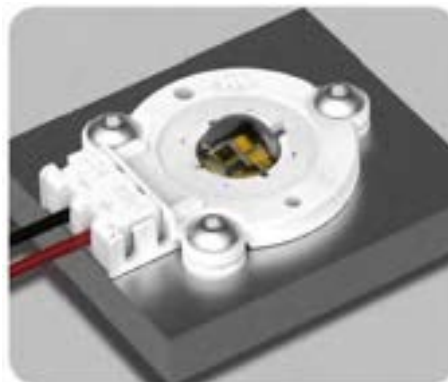
Al fine di validare il design ottico del sistema di illuminazione localizzata è stato costruito un prototipo funzionale del sistema a ottica variabile costituito dai seguenti componenti:

- Dissipatore in alluminio alettato (250x200 mm, con altezza delle alette 30 mm). Il componente presenta una resistenza termica, sufficiente a dissipare il calore sviluppato dal LED
- LED Luxeon S LXS8-PW40 con temperatura di colore di 4000 K e flusso nominale di 1450 lm<sup>45</sup> alla temperatura di giunzione T<sub>j</sub>=85°C e alimentato alla corrente di 700 mA. L'indice di resa cromatica CIE CRI è pari a 80, con indice R<sub>9</sub>>20. La resistenza termica del LED risulta pari a 1.3 C/W.



**Figura 125 LED Array Lumiled Luxeon S usato per la prototipazione**

- Socket TE tipo LS senza saldature per LED Lumiled Luxeon S: la sua funzione è quella di assicurarne il collegamento elettrico dei LED e di fissarne il case al dissipatore garantendo una buona resistenza di contatto. L'accoppiamento termico tra LED e dissipatore è stato realizzato mediante grasso termo-conduttivo



**Figura 126 Holder per LED Lumileds Luxeon S**

- Lente CARCLO diametro 30 mm con finitura superiore frosted adatta per LED Luxeon S LXS8-PW40, con apertura 45°

<sup>45</sup> Valore tipico dichiarato dal costruttore



Figura 127 Lente CARCLO frosted diametro 30 mm

- Lente a fuoco variabile OPTOTUNE ML-55-106 diametro 50 mm a fuoco variabile, con fattore di trasmissione migliore del 90%. Questa lente funziona da condensatore ottico e alla massima curvatura consente di ottenere un fascio stretto, mentre alla minima curvatura produce un fascio con la medesima apertura delle lenti di collimazione applicata al LED



Figura 128 Lente OPTOTUNE ML55-106

Lo schema di principio del dispositivo è illustrato alla Figura 129, dove sono riportate le distribuzioni luminose

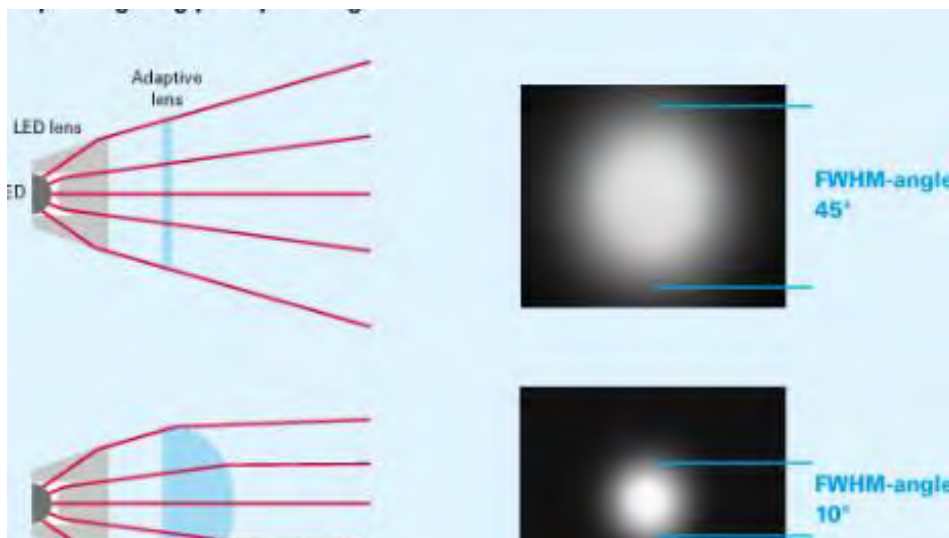


Figura 129 Schema di principio del sistema ottico a fuoco variabile utilizzato. Nella parte superiore della figura è riportata la condizione di fascio largo, mentre nella parte inferiore la condizione di fascio stretto.

ottenibili sul piano di lavoro quando la lente si trova alla massima curvatura o risulta piana.

Il primo prototipo di studio vuole verificare la possibilità di impiegare come collimatore una lente TIR con finitura frosted della superficie emittente superiore e in particolare di valutarne l'apertura del fascio, l'uniformità di illuminamento all'interno dell'apertura e infine l'uniformità cromatica e l'assenza di fenomeni molto fastidiosi quali yellow ring per tutte le condizioni intermedie di regolazione dell'ampiezza del fascio.

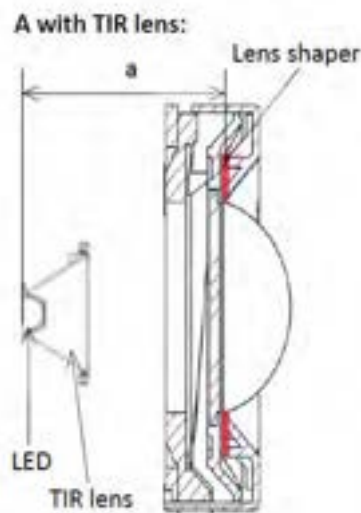
Il primo passo è stato valutare il rendimento ottico dell'intero dispositivo, tenuto conto del fatto che la distanza tra la lente OPTOTUNE e la superficie di uscita del collimatore, deve tenere conto di due diverse esigenze:

- Garantire aperture del fascio luminoso comprese tra 10-15° nella regolazione narrow e 45° nelle configurazione wide (per un'altezza di circa 75-80 cm, queste due aperture garantiscono un'area luminosa di 15- 70 cm di diametro). Nella Figura 130, sono riportate due possibili configurazioni per il LED Luxeon S: la prima che utilizza la lente frosted CARCLO e la seconda che utilizza un riflettore (collimatore) e un diffusore olografico con apertura del fascio di 10° (supponendo che il fascio incidente risulti collimato). Gli aperture ottenibili con queste due soluzioni sono in linea con le specifiche.

LED	Max. flux LED	Secondary Optics	Diffuser*	Distance a (/ and b)	Wide angle (FWHM)	Narrow angle (FWHM)
Lumileds Luxeon S	1300 lm	Carclo 30mm Frosted Wide TIR, Part no. 10758	No	44 mm	50°	11°
Lumileds Luxeon S	1300 lm	Ledil Venla-WW-Vega Reflector, Part no. C11777	Yes	52 mm	55°	17°

**Figura 130 Soluzioni possibili per il sistema di collimazione<sup>46</sup>**

- Massimizzare l'efficienza del dispositivo, riducendo la quantità di flusso luminoso che fuoriuscito dal collimatore del LED, non viene catturato dalla lente a fuoco variabile.

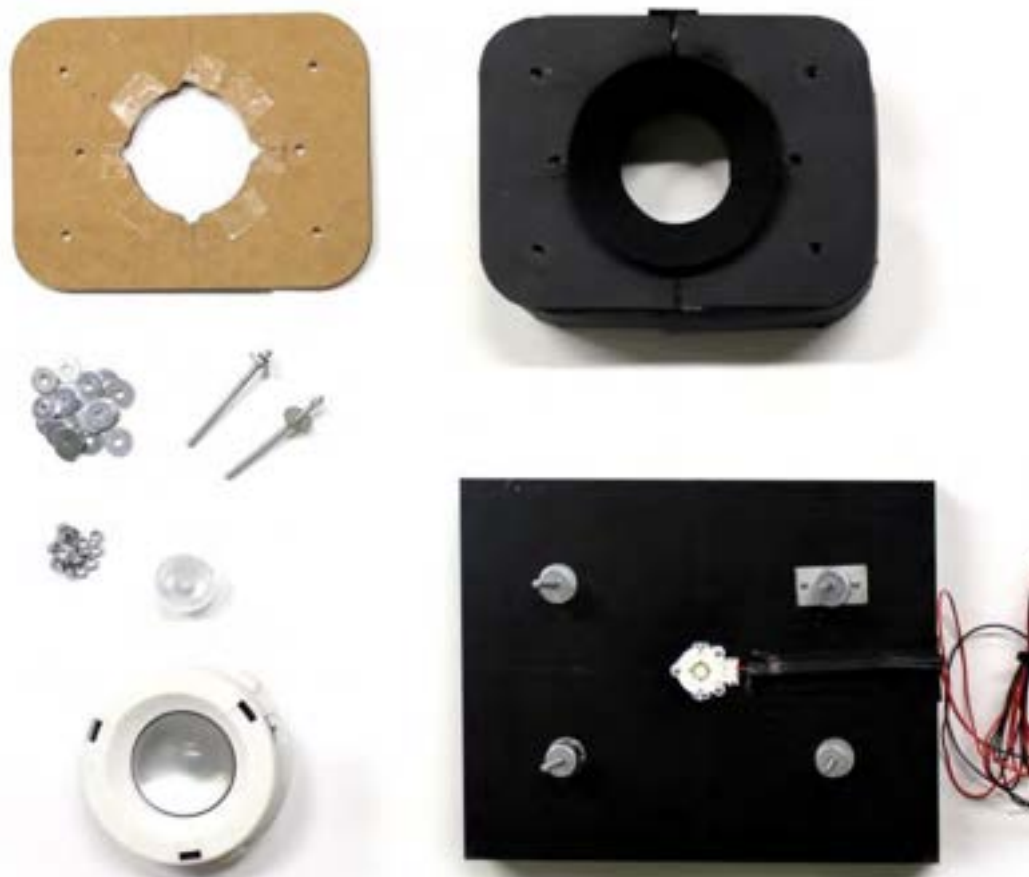


**Figura 131 Schema del sistema ottico del prototipo 01 e indicazione della distanza geometrica "a" da ottimizzare**

L'efficienza del sistema terrà conto, oltre che del rendimento del sistema ottico, anche dell'efficienza della sorgente LED impiegata: per il LED considerato, l'efficienza luminosa risulta pari a 81 lm/W (alla corrente

<sup>46</sup> Application Note ML-55-106 for lighting

di 700 mA, con temperatura di giunzione di 85°C la tensione diretta risulta pari a 25.6 V, con una potenza elettrica di 17.92 W, mentre il flusso emesso tipico, dichiarato dal costruttore risulta pari a 1450 lm).



**Figura 132 Componenti del prototipo di studio per la soluzione 01 con lente collimatrice CARCLO e lente OPTOTUNE**

Il flusso luminoso in uscita dal sistema LED+Holder risulta pari a 771.47 lm, alimentando il LED alla corrente di 0.34986 A con una tensione ai capi del LED di 25.905 V e una potenza assorbita di 9.0631233 W e una efficienza di 85.1 lm/W: il valore del flusso deve essere confrontato con quello dichiarato dal costruttore pari a 764.54 lm per una corrente di alimentazione di 350 mA e una temperatura di giunzione pari a 85°C<sup>47</sup>.

<sup>47</sup> Il valore per cui moltiplicare il flusso luminoso è stato stimato dall'andamento del grafico Relative light Output vs Forward Current alla temperatura di giunzione di 85° C. Tale correzione è stata stimata in 0.5272



**Figura 133 Soluzione 01: prototipo utilizzato per le misure di flusso (sistema completo e di ciascun componente)**

Si osserva che la distribuzione fotometrica del LED risulta modificata dalla presenza del holder e dei perni di fissaggio utilizzati per il montaggio delle altre componenti nel sistema completo.

I componenti utilizzati per la realizzazione del prototipo di studio sono riportati alla Figura 132.

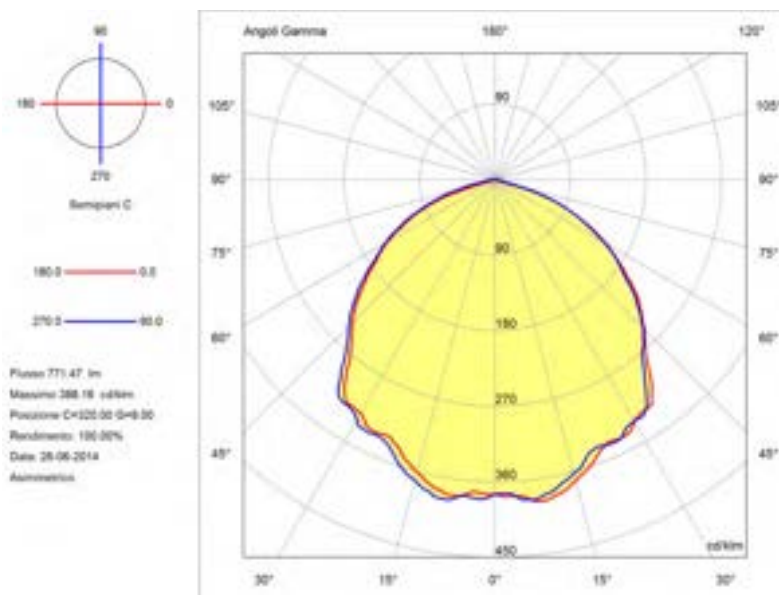


Figura 134 Indicatrici di emissione del sistema LED + Holder nei due piani fondamentali (C=0-180° e C=90-270°)



Figura 135 Soluzione 01 durante le verifiche fotometriche

La distribuzione fotometrica del sistema LED+lente è riportata alla Figura 136: il valore del flusso emesso risulta pari a 621.89 lm con un fascio di apertura di 44.6°, come mostrato dalla Figura 137. Il valore di



rendimento ottico della lente di collimazione risulta approssimativamente pari a  $621.89/771.47 = 0.81$ , valore plausibile data la finitura della superficie di emissione.

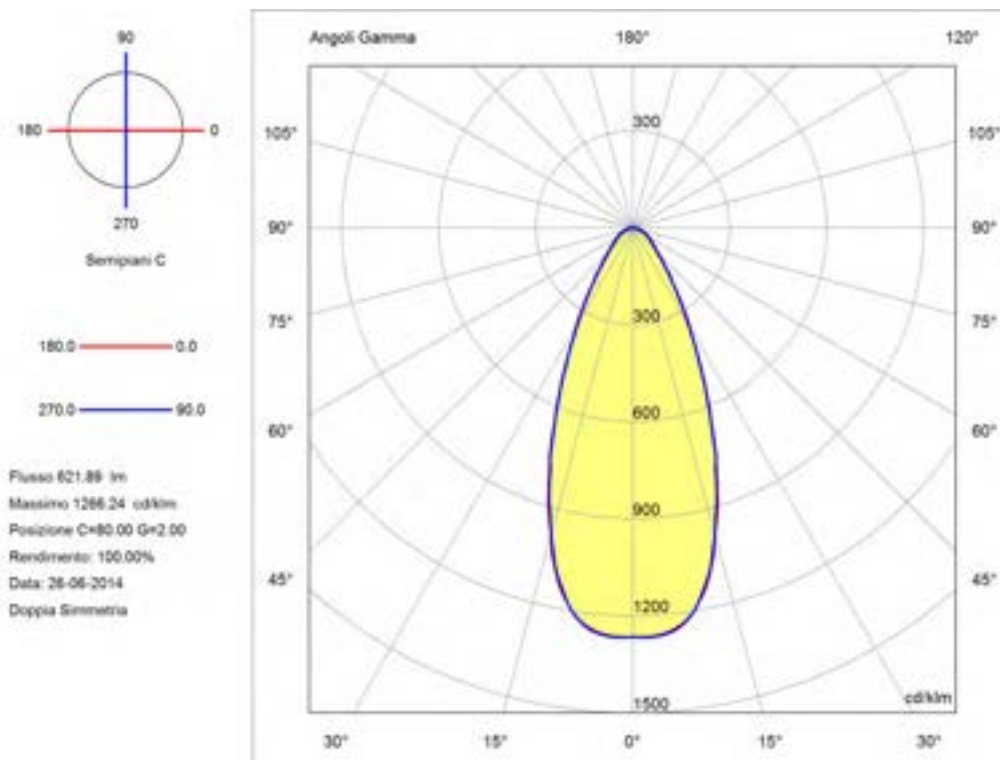


Figura 136 Indicatrice di emissione della lente di collimazione CARCLO 10758

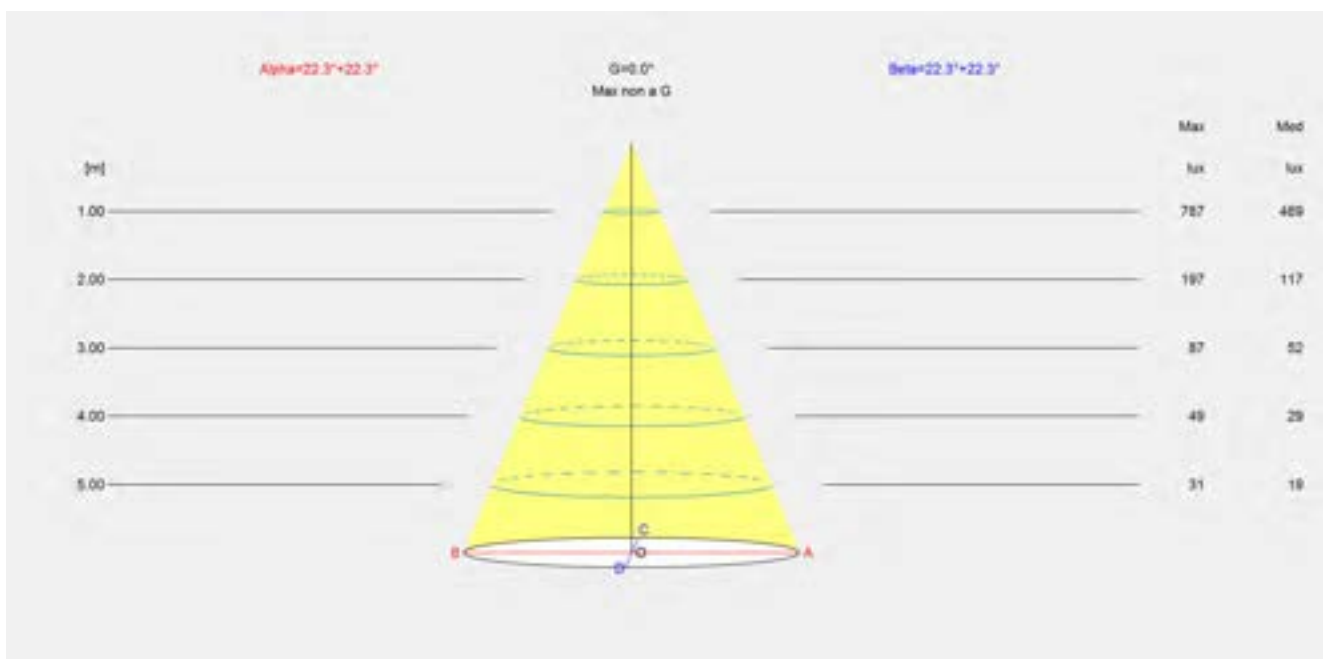


Figura 137 Apertura del fascio (convenzione 50% di  $I_{max}$ ) per il sistema LED+Ottica di collimazione

La distribuzione fotometrica ottenuta con l'aggiunta della lente a fuoco variabile, nella posizione di massima apertura del fascio è riportata alla Figura 138, mentre l'apertura del fascio è riportata Figura 139. Il flusso emesso risulta pari a 452.12 lm, con un rendimento ottico complessivo pari a  $452.12/771.47 = 0.59$ , il valore di efficienza luminosa risulta pari a  $452.12/9.0631233 = 49.89$  lm/W.

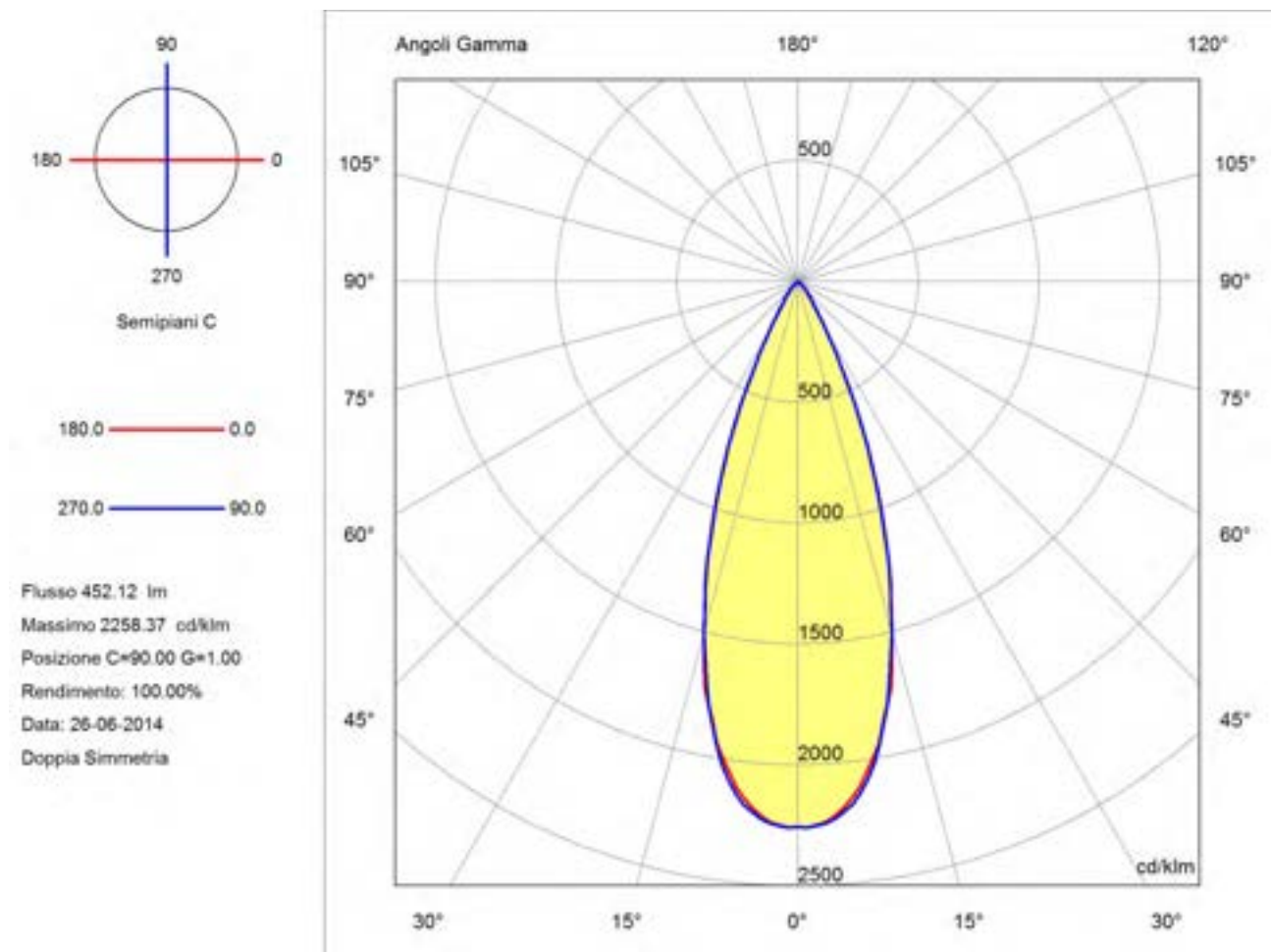


Figura 138 Indicatrici di emissione nei piani C=0-180° e C=90-270° con fascio wide

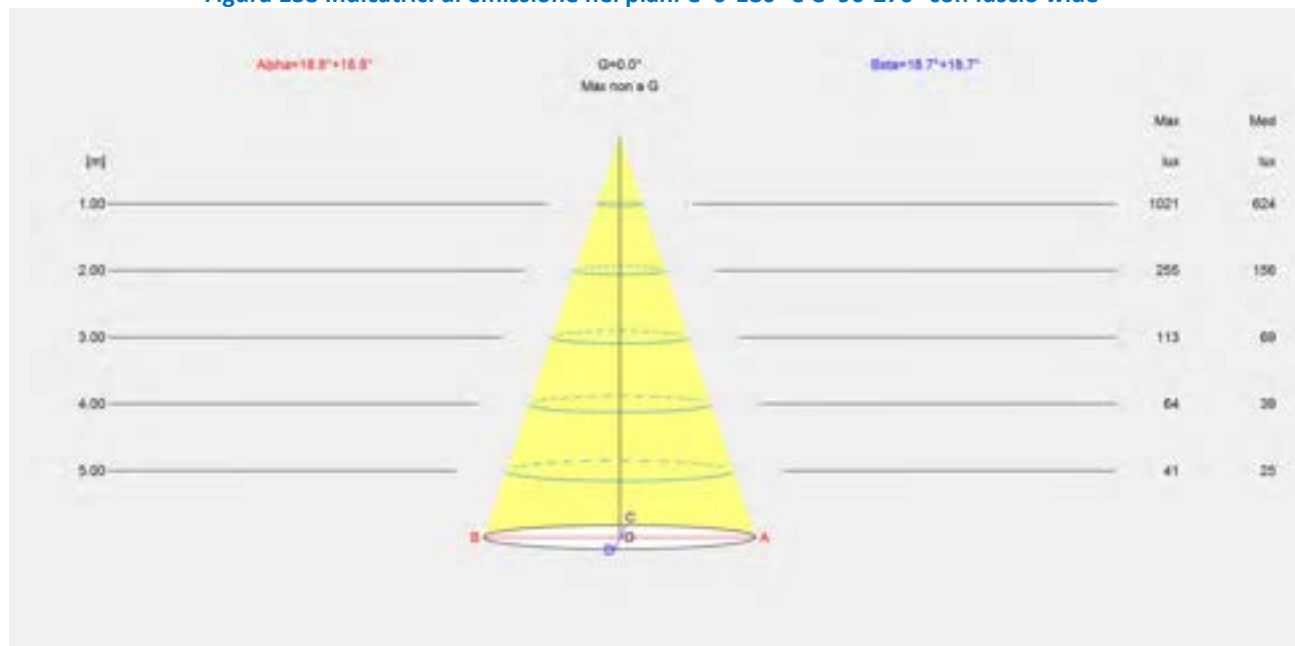


Figura 139 Apertura del fascio del sistema completo nella configurazione wide

La distribuzione fotometrica ottenuta con l'aggiunta della lente a fuoco variabile, nella posizione di minima apertura del fascio è riportata alla Figura 140, mentre l'apertura del fascio è riportata Figura 141. Il flusso

emesso risulta pari a 409.64 lm, con un rendimento ottico complessivo pari a  $409.64/771.47=0.53$ , il valore di efficienza luminosa risulta pari a  $409.64 / 9.0631233=45.20$  lm/W.

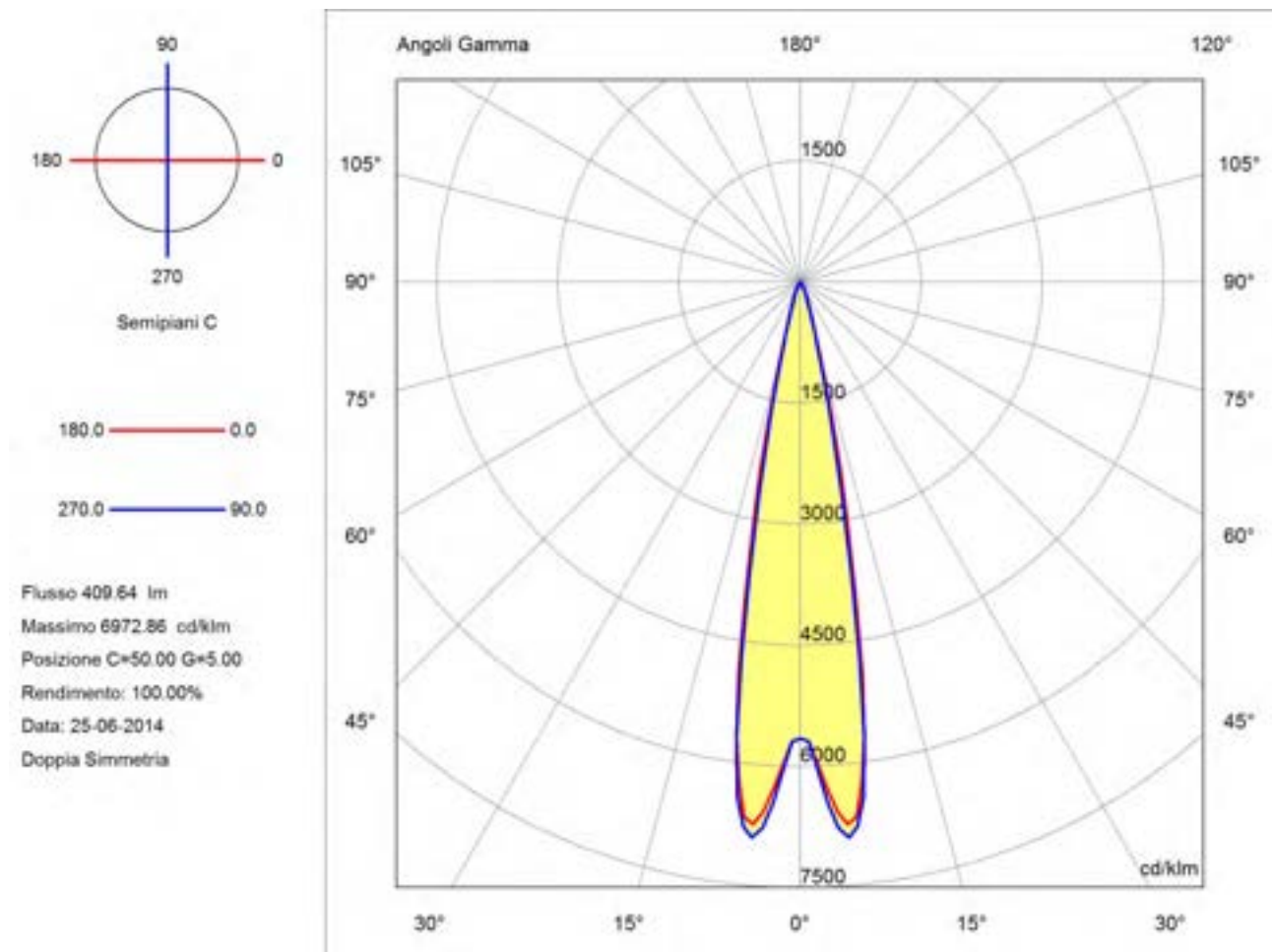


Figura 140 Indicatrici di emissione nei piani C=0-180° e C=90-270° con fascio narrow

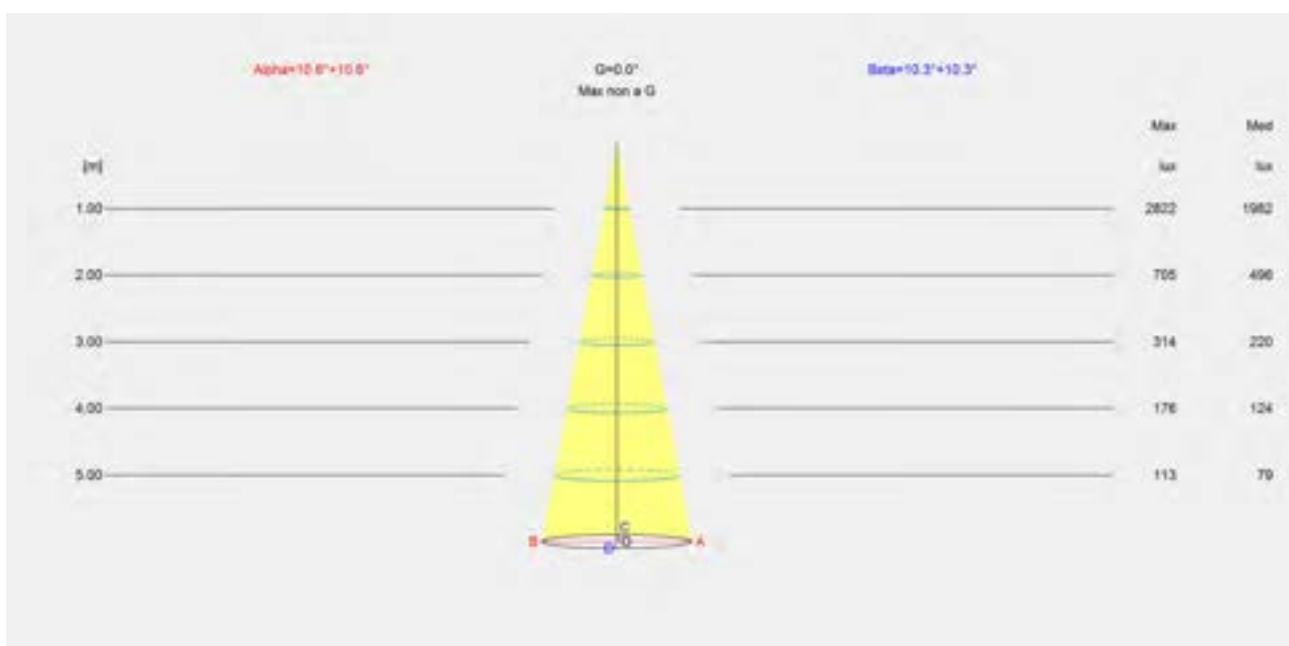


Figura 141 Apertura del fascio del sistema completo nella configurazione narrow

Le differenze nei valori di apertura ottenuti dalla misura del prototipo rispetto a quelli previsti dallo schema della Figura 131, sono da imputarsi alla presenza di differente angolo di schermatura (cono assorbente) applicato al meccanismo in materiale plastico che consente la variazione della focale della lente (cfr. con Figura 133) e alle inevitabili tolleranze di costruzione (per esempio accuratezza nel posizionamento della lente a fuoco variabile rispetto al piano di emissione del LED) di un prototipo realizzato interamente a mano.

### 6.2.2 Soluzione 02: LED COB + Lente di Fresnel Khatod

Al fine di valutare le performance del prodotto in termini di rendimento ottico e di efficienza, si è deciso di realizzare un secondo prototipo costituito da un LED COB e da una lente di Fresnel che realizzasse uno zoom molto semplice attraverso la variazione della distanza tra sorgente e lente (Figura 142).



**Figura 142 Soluzione 02 utilizzata come termine di confronto per la valutazione delle prestazioni della Soluzione 01**

La lente Fresnel utilizzata è un prodotto Khatod PL1368 realizzata in PMMA con un diametro di circa 81.80 mm e uno spessore di 11.24 mm, capace di realizzare tre differenti distribuzioni luminose: narrow, medium, wide. Il LED impiegato per le misure è un COB Lumileds modello LHC1-4080-1205, con temperatura di colore neutra 4000 K, indice di resa cromatica CIE CRI 80<sup>48</sup>, flusso luminoso di 2600 lm, quando alimentato alla corrente di 600 mA, con una efficienza luminosa di 122 lm/W, alla temperatura di giunzione di 85°C.

Sono state eseguite una serie di misure per diverse distanze della lente dal COB, ottenendo le indicatrici di emissione riportate alla Figura 143, Figura 145, Figura 147, Figura 149 e le aperture dei fasci corrispondenti come mostrato alla Figura 144, Figura 146, Figura 148 e Figura 150.

Il flusso emesso da COB, risulta pari a 1543.80 lm quando alimentato alla corrente di 350 mA, con una potenza elettrica assorbita pari a 12.051 W, con una efficienza luminosa pari a 128.10 lm/W

<sup>48</sup> La cromaticità del LED è contenuta in una ellisse a 3 step di MacAdam

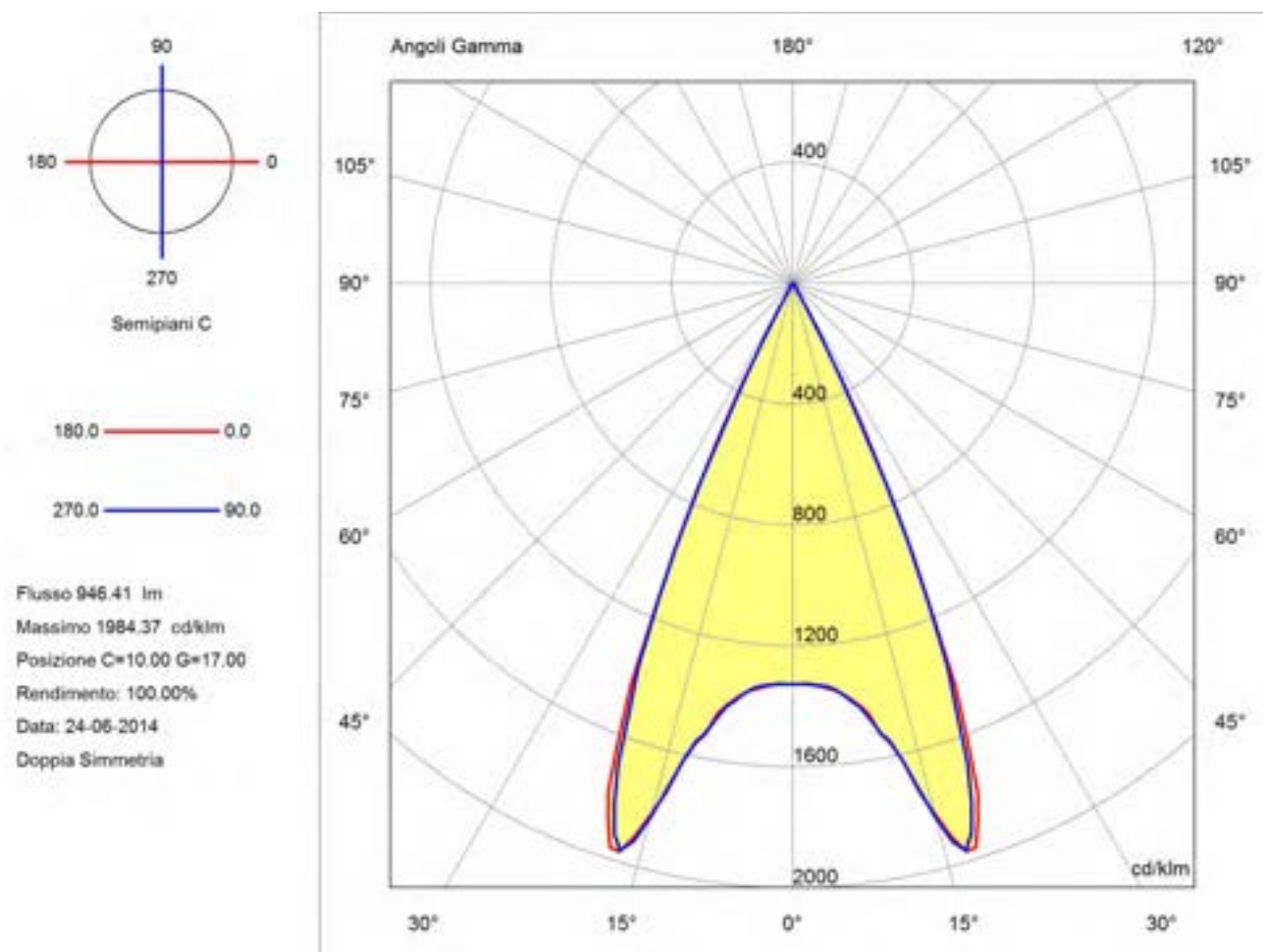


Figura 143 Indicatrici di emissione con Fresnel Lens posizione 01

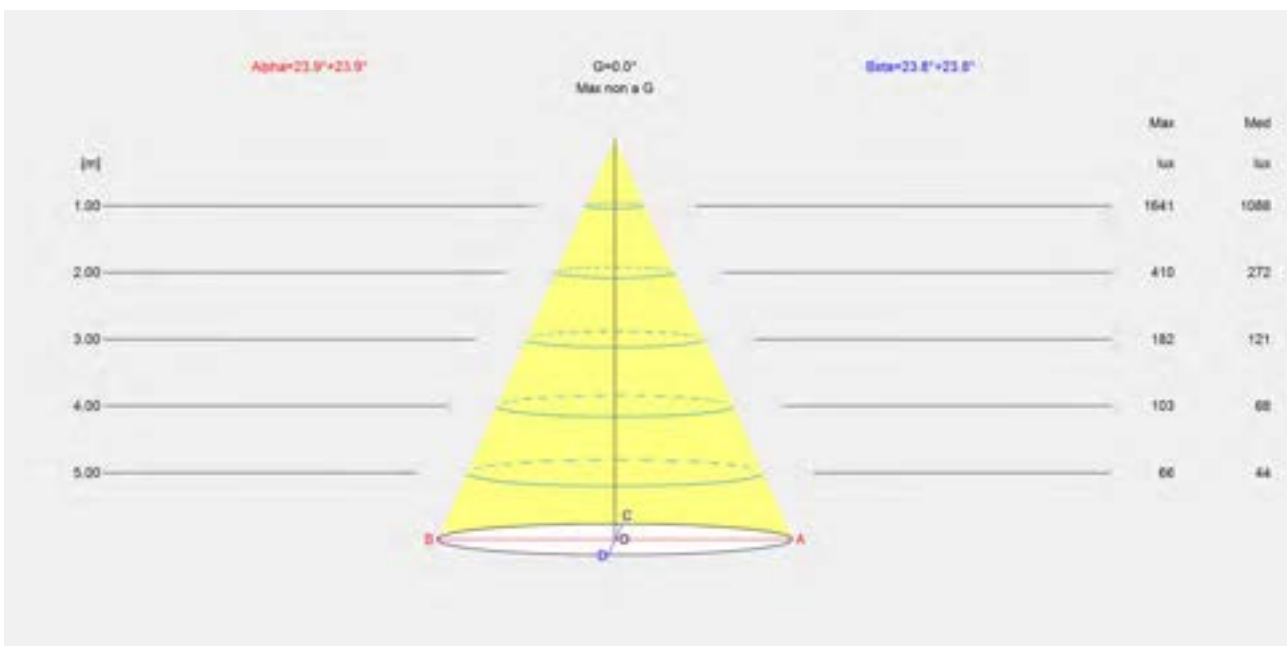


Figura 144 Apertura del fascio con Fresnel Lens posizione 01

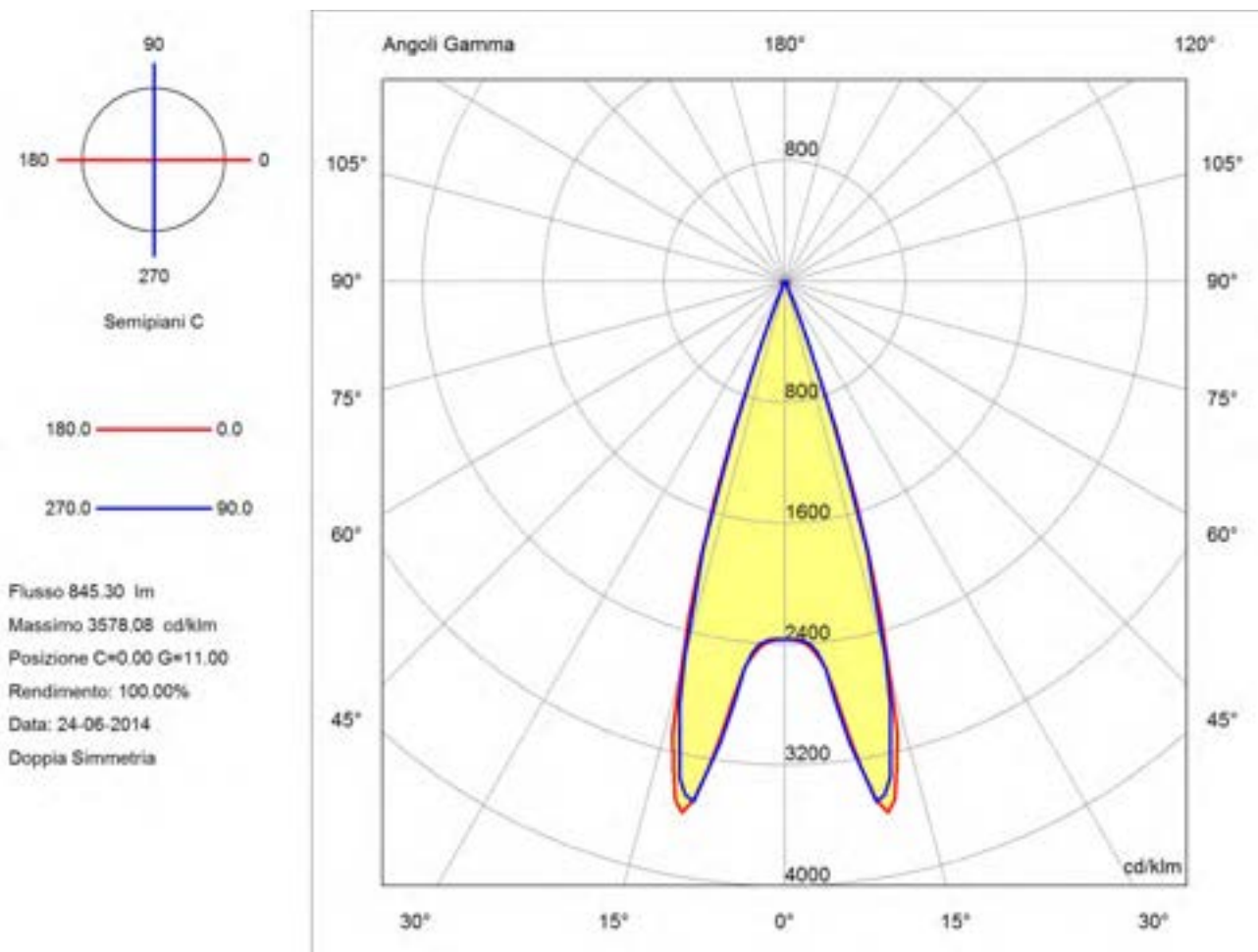


Figura 145 Indicatrici di emissione con Fresnel Lens posizione 02

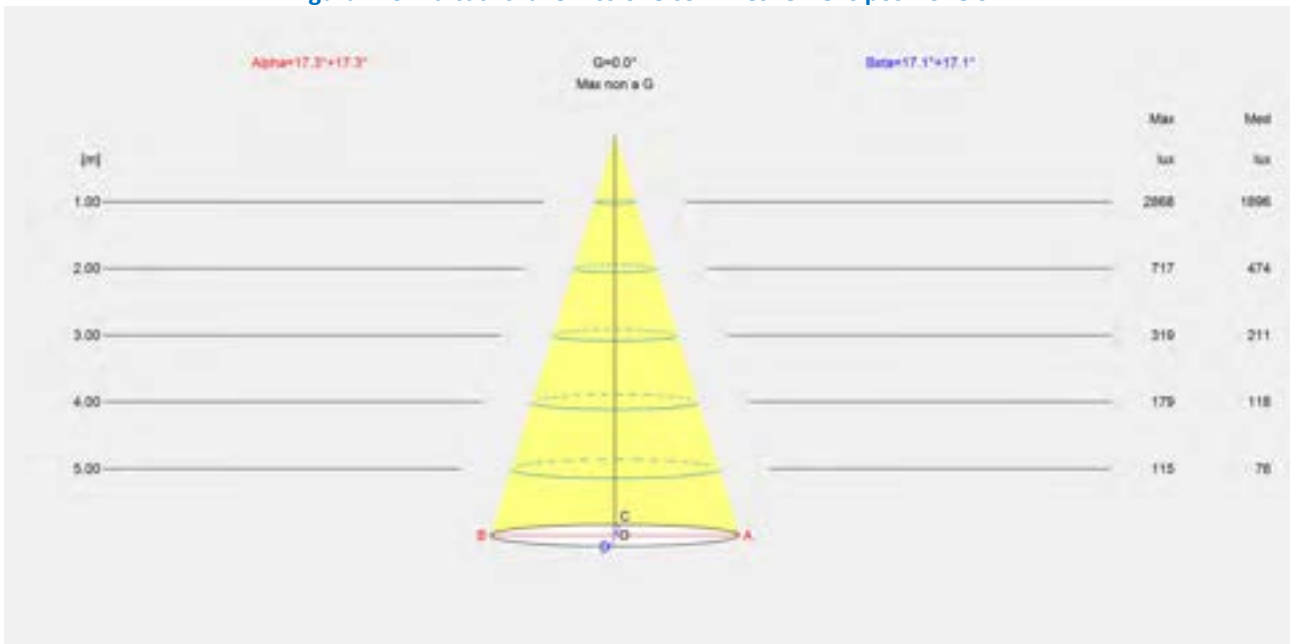


Figura 146 Apertura del fascio con Fresnel Lens posizione 02

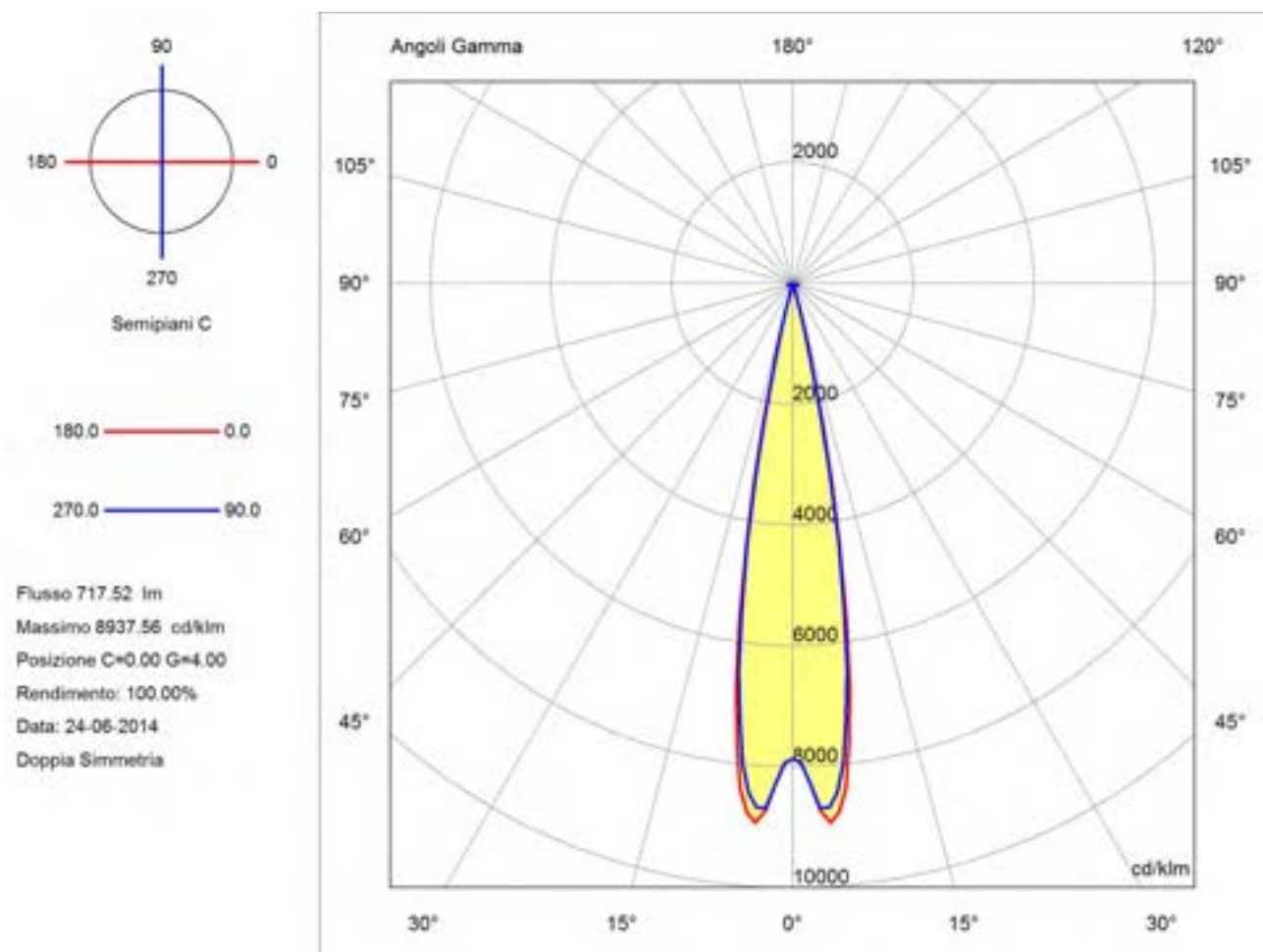


Figura 147 Indicatrici di emissione con Fresnel Lens posizione 03

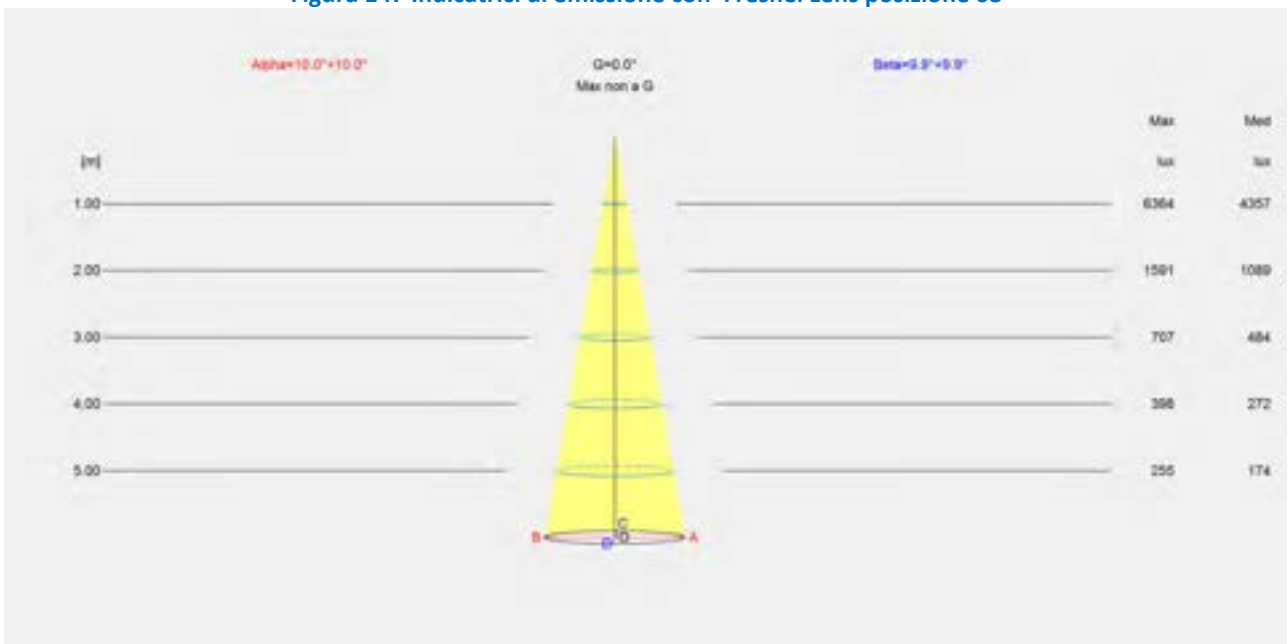


Figura 148 Apertura del fascio con Fresnel Lens posizione 03

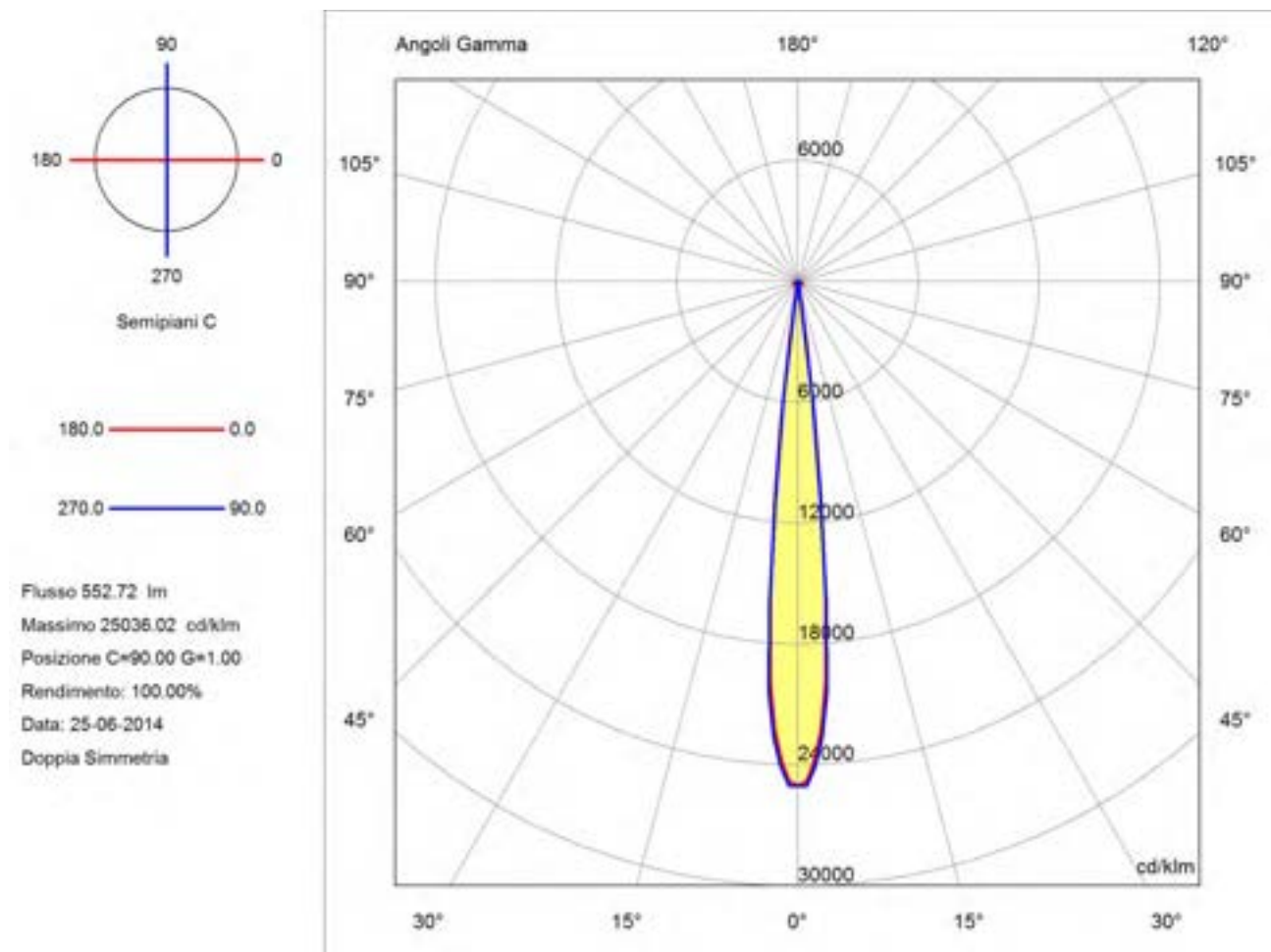


Figura 149 Indicatrici di emissione con Fresnel Lens posizione 04

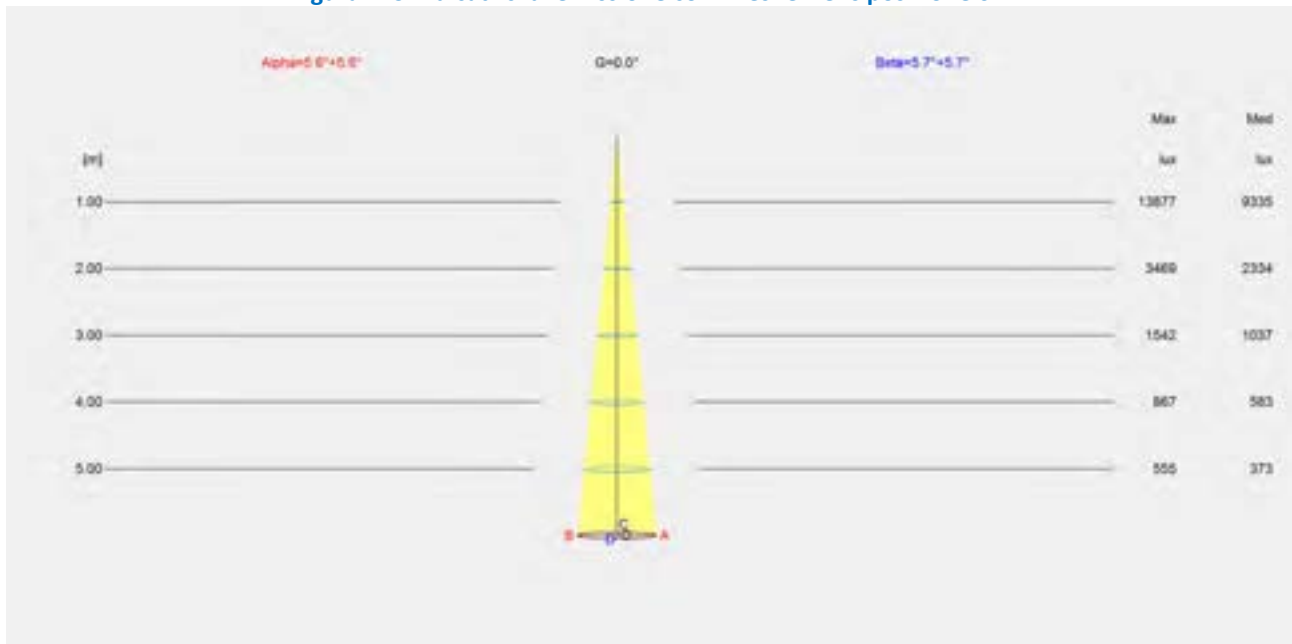


Figura 150 Apertura del fascio con Fresnel Lens posizione 04





**Figura 151 Misura prototipo di studio con lente di Fresnel**

**Tabella 4 Tabella riassuntiva delle prestazioni ottenute dal prototipo 1 e Prototipo con lente di Fresnel**

Prototipo	Apertura del fascio	Flusso emesso (lm)	Flusso Sorgente LED (lm)	Potenza elettrica assorbita (W)	Rendimento ottico	Efficienza prototipo (lm/W)
Soluzione 01	37.6°	452.12	771.47	9.063	0.59	49.89
Soluzione 01	20°	409.64	771.47	9.063	0.53	45.20
Fresn. 1	47.8°	946.61	1543.80	12.051	0.61	78.55
Fresn. 2	34.6°	845.30	1543.80	12.051	0.55	70.14
Fresn. 3	20°	717.52	1543.80	12.051	0.46	59.54
Fresn. 4	11.2°	552.72	1543.80	12.051	0.36	45.86

Dall'esame dei dati si osserva che a parità di angolo di emissione, il rendimento ottico della soluzione 01 sia da preferirsi a quello con lente di Fresnel, ma l'efficienza del secondo risulta superiore per merito essenzialmente di un LED maggiormente performante: in tale considerazione, si ritengono trascurabili le possibili differenze nella temperatura di giunzione, dovuti al differente valore della resistenza termica in quanto i due dissipatori utilizzati risultano abbondantemente sovradimensionati rispetto al valore di potenza termica da dissipare.

6.2.3 Soluzione 03: LED Array + Riflettore Venla + Diffusore Olografico (10°) + Lente Optotune

La soluzione 03 rappresenta una evoluzione della soluzione 01, in cui il sistema di collimazione con lente TIR è stata sostituita da un riflettore e da un diffusore olografico (Figura 152).



Figura 152 Soluzione alternativa del prototipo 2, dove la lente TIR è stata sostituita da un riflettore e da un diffusore olografico

Nello schema della Figura 153, il riflettore funziona da collimatore dell’emissione luminosa del LED, mentre il riflettore olografico (Luminit L10A6-16) modifica l’apertura in modo da ottenere il migliore accoppiamento tra sistema di collimazione e lente a fuoco variabile.

Il LED utilizzato in questa soluzione è il medesimo impiegato nella precedente, alimentato allo stesso valore nominale di corrente di 350 mA (flusso luminoso del sistema LED+holder pari a 771 lm con assorbimento di potenza da parte del LED pari a 9.06 W).

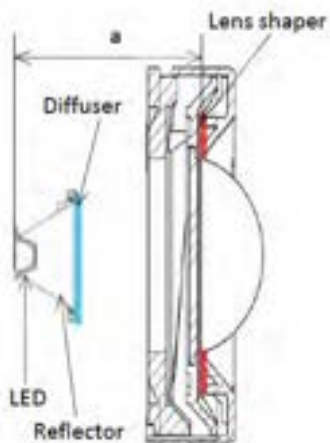


Figura 153 Sistema di collimazione alternativo alla lente TIR

Al fine di realizzare un prototipo funzionante a livello termico e ottico che potesse essere misurato, è stato costruito un prototipo di studio: in particolare, il sistema ottico costituito dal riflettore Venla (produttore

Ledil) e dal diffusore olografico (con ampiezza  $10^\circ$ ) sono stati disegnati e realizzati mediante taglio laser di pannelli in MDF su specifico disegno successivamente assemblati. (Figura 154)



**Figura 154 Sistema ottico per la Soluzione 03: riflettore Venla e diffusore olografico Luminix ( $10^\circ$ )**

Il prototipo di studio assemblato è costituito dal sistema LED e holder descritto per la soluzione 01, il sistema ottico precedentemente raffigurato e la lente Optotune utilizzata anch'essa nella soluzione 01. Le componenti da cui è costituito sono raffigurate nella Figura 155 mentre il prototipo di studio completamente assemblato è raffigurato nella Figura 156. Si noti in quest'ultima che non è stata realizzata alcuna mascheratura esterna in quanto il sistema ottico di riflessione risulta completamente schermato.

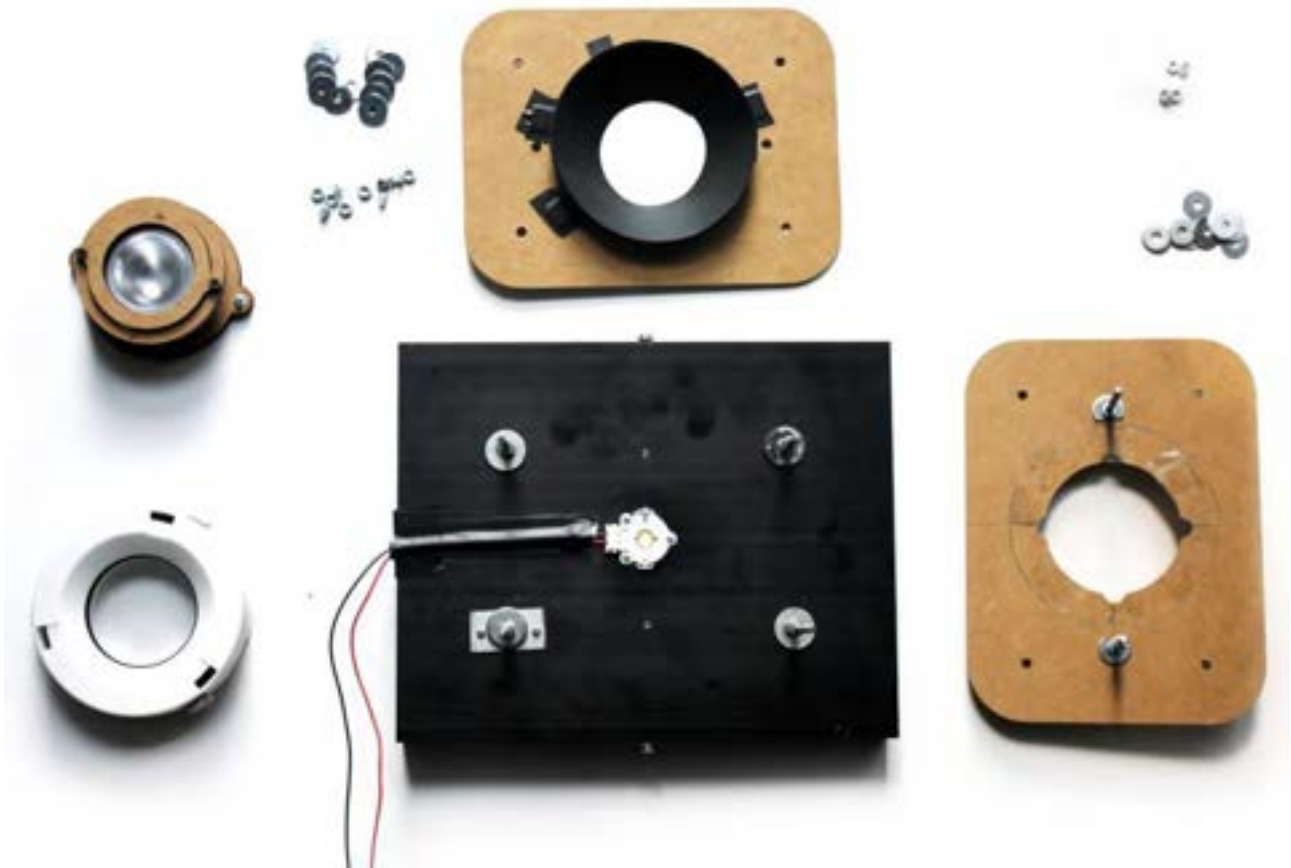
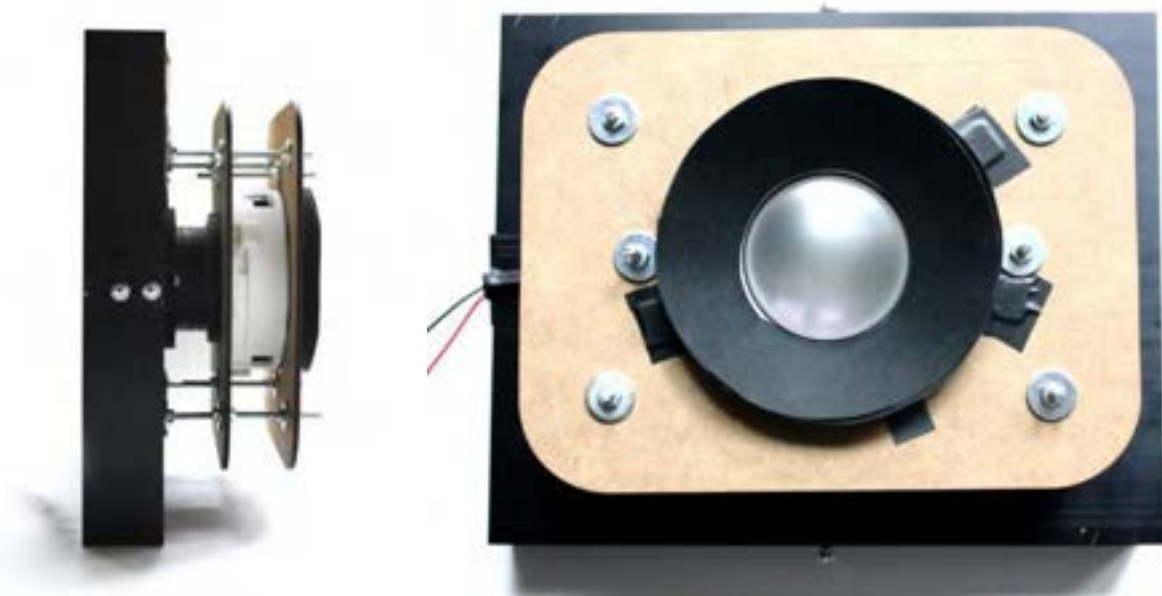
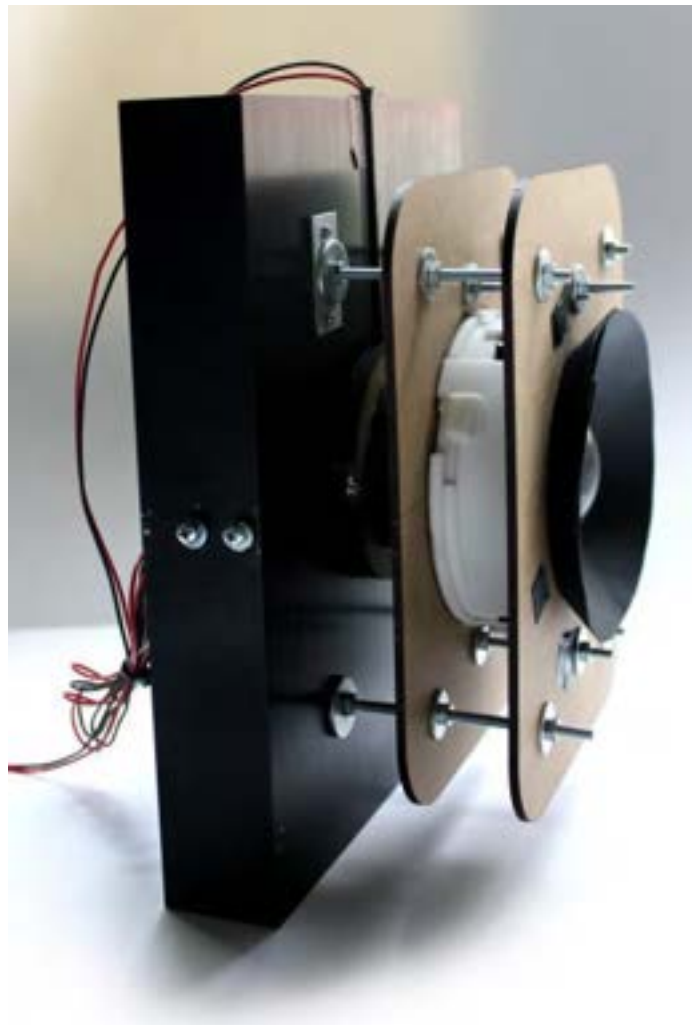


Figura 155 Componenti del prototipo di studio per la Soluzione 03: LED Luxeon S e holder, riflettore Venla e diffusore olografico Luminit (10°) nell'apposito contenitore, lente Optotune e struttura di mascheratura limitata alla sola parte superiore





**Figura 156 Soluzione 03: prototipo utilizzato per le misure di flusso (sistema completo e di ciascun componente)**

Le indicatrici di emissione del sistema nella configurazione wide sono riportate alla Figura 157, mentre alla Figura 158 sono riportate le indicatrici di emissione della soluzione 02 nella configurazione narrow.

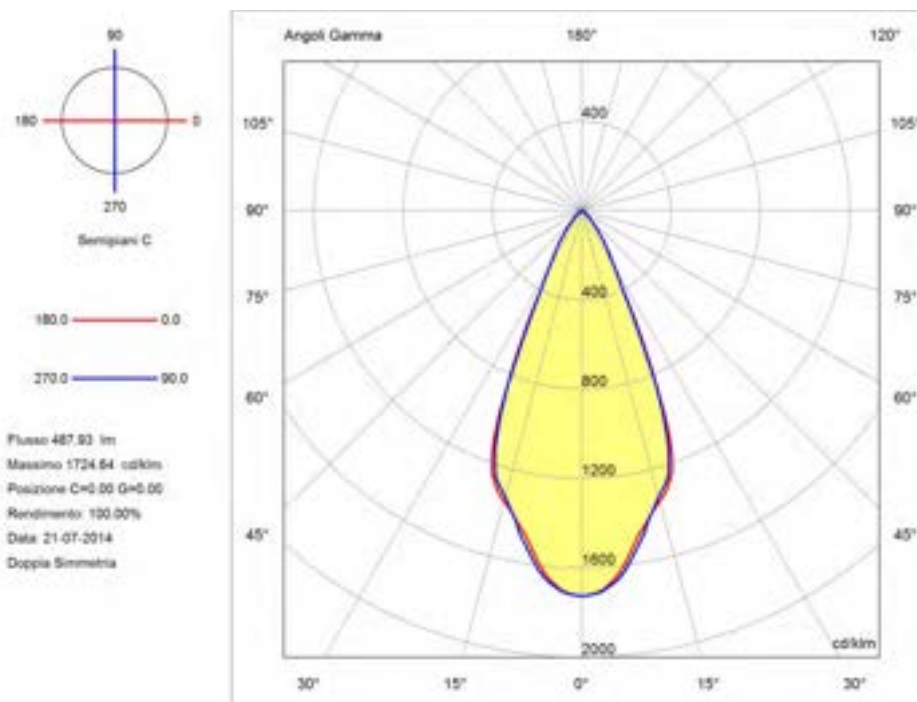


Figura 157 Indicatrici di emissione, relativi alla soluzione 2 nei piani C=0-180 e C=90-270° nella configurazione di fascio wide

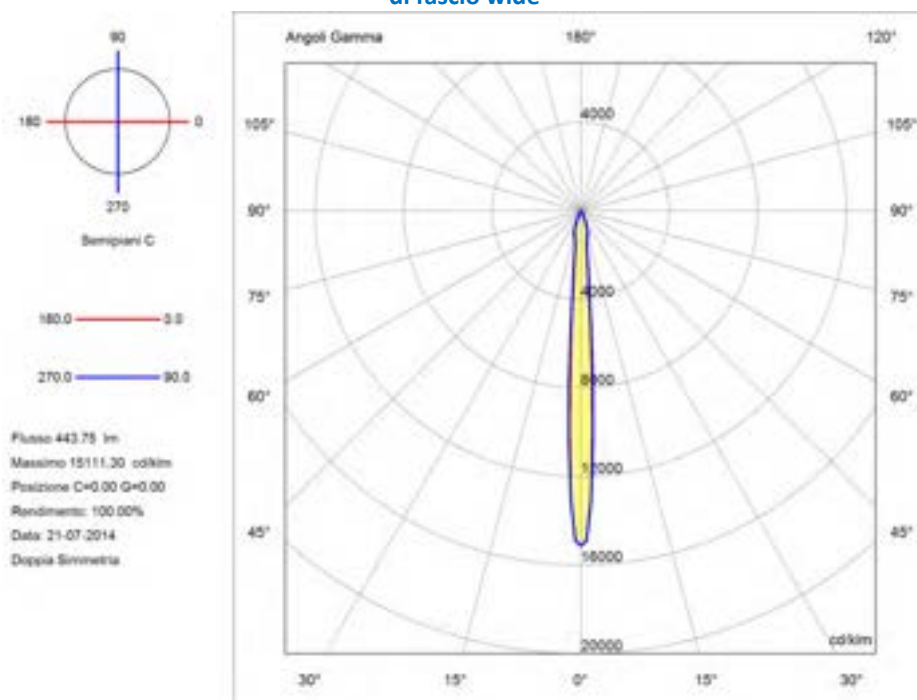
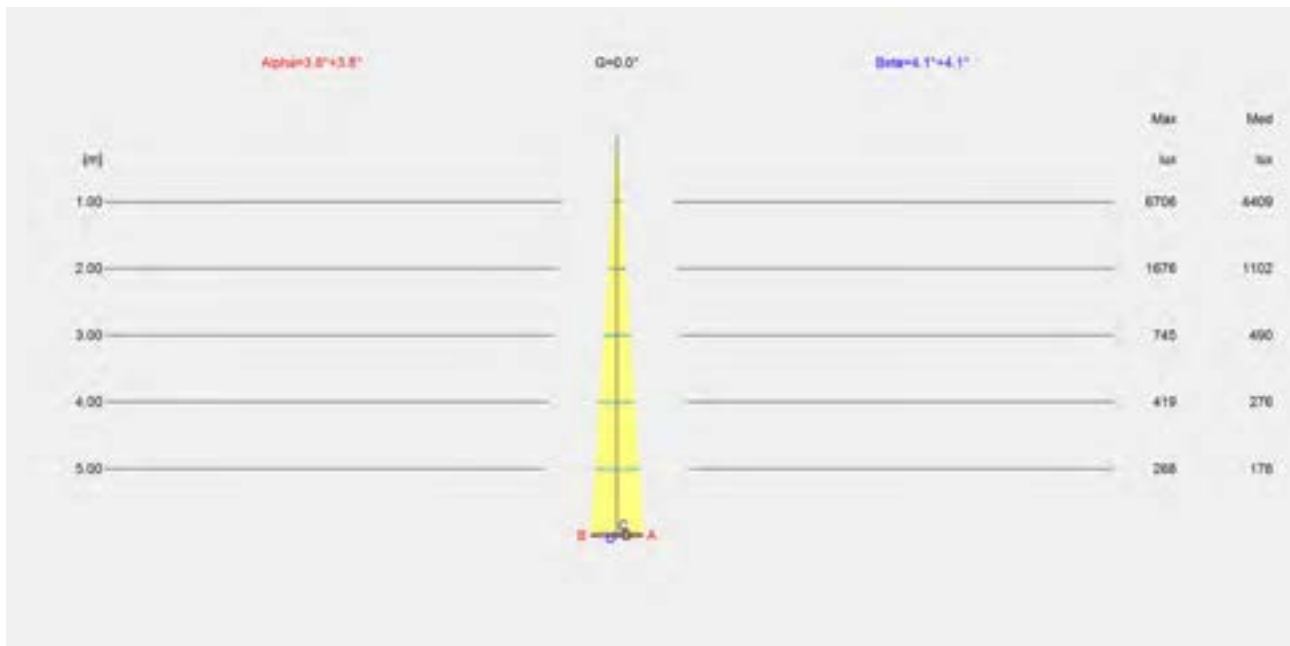
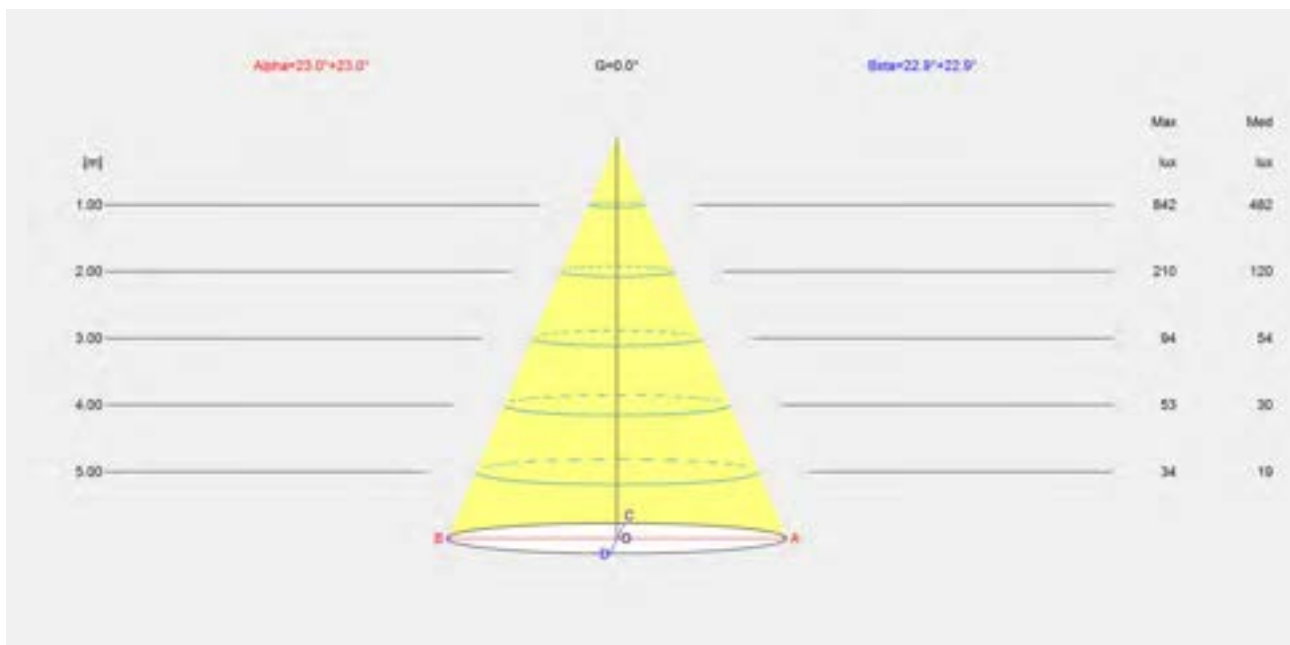


Figura 158 Indicatrici di emissione, relativi alla soluzione 2 nei piani C=0-180 e C=90-270° nella configurazione di fascio narrow

Si osserva che l'apertura nella configurazione narrow risulta molto simile a quella ottenuta dal sistema con lente di Fresnel (posizione 04), con una apertura di 2x4° circa (Figura 159). L'apertura del fascio nella configurazione wide risulta pari a 2x23°, come indicato alla Figura 160 e risulta molto prossima a quella della soluzione basata su lente di Fresnel (posizione 01).



**Figura 159** Apertura della soluzione 02 nella configurazione narrow



**Figura 160** Apertura della soluzione 02 nella configurazione wide

Le efficienze luminose della soluzione 03 (ad esclusione delle perdite del sistema di alimentazione) risultano pari a  $443.75 \text{ lm} / 9.04 \text{ W} = 49.08 \text{ lm/W}$  per la configurazione narrow e pari a  $487.93 \text{ lm} / 9.04 \text{ W} = 53.97 \text{ lm/W}$  per l'emissione wide.

Per quanto riguarda il rendimento ottico, nella configurazione wide il sistema raggiunge il 63.2%, mentre nelle configurazione narrow, il rendimento scende al 57.5 %.

#### 6.2.4 Soluzione 4: Modulo LED ibrido Tridonic Talex + Riflettore Angela + Diffusore olografico 80°

Questa soluzione nasce dall'esigenza di ottenere un sistema a temperatura di colore variabile con elevato valore dell'indice di resa cromatica: il dispositivo è composto da un modulo TRIDONIC TALEX e da un riflettore LEDIL ANGELA-S (F 13379). L'emissione del modulo (si tratta di una soluzione a tecnologia ibrida) viene uniformata cromaticamente mediante due differenti diffusori:

- Diffusore originale TRIDONIC
- Diffusore per color mixing LEDIL

Il sistema a LED ibrido emette un flusso luminoso di 880.62 lm , con una potenza assorbita di 14.1 W alla temperatura di colore di 4000 K (nominale), comprensiva delle perdite del sistema di alimentazione e regolazione della luminosità e della temperatura di colore.

Al fine di ottenere una distribuzione luminosa variabile, ovvero che l'ampiezza del fascio possa essere aumentato o diminuito in base alle differenti condizioni di lavoro e alle preferenze degli individui, è stato selezionato un sistema ottico (riflettore Angela-S) in grado di creare un fascio di luce di ampiezza narrow stretto ed è stato successivamente inserito un sistema ottico per aumentare il fascio stesso studiato sul concetto del diaframma. In particolare, il sistema di diffusione è basato sul materiale diffusivo olografico (Luminit) tagliato al laser in quattro parti uguali a formare il diaframma che scorre e si sposta sul supporto anch'esso derivato dal disegno e dal taglio laser di materiale MDF. (Figura 161)



**Figura 161 Sistema ottico per la modificazione dell'ampiezza del fascio di luce per la Soluzione 04: diaframma costruito mediante taglio laser del diffusore olografico Luminit (80°)**

Il prototipo di studio assemblato è costituito dai componenti rappresentati in Figura 162 e risulta in grado di variare il fascio mediante il movimento delle 4 parti del diaframma che possono essere fatte scorrere nel supporto mediante una manopola (Figura 163).



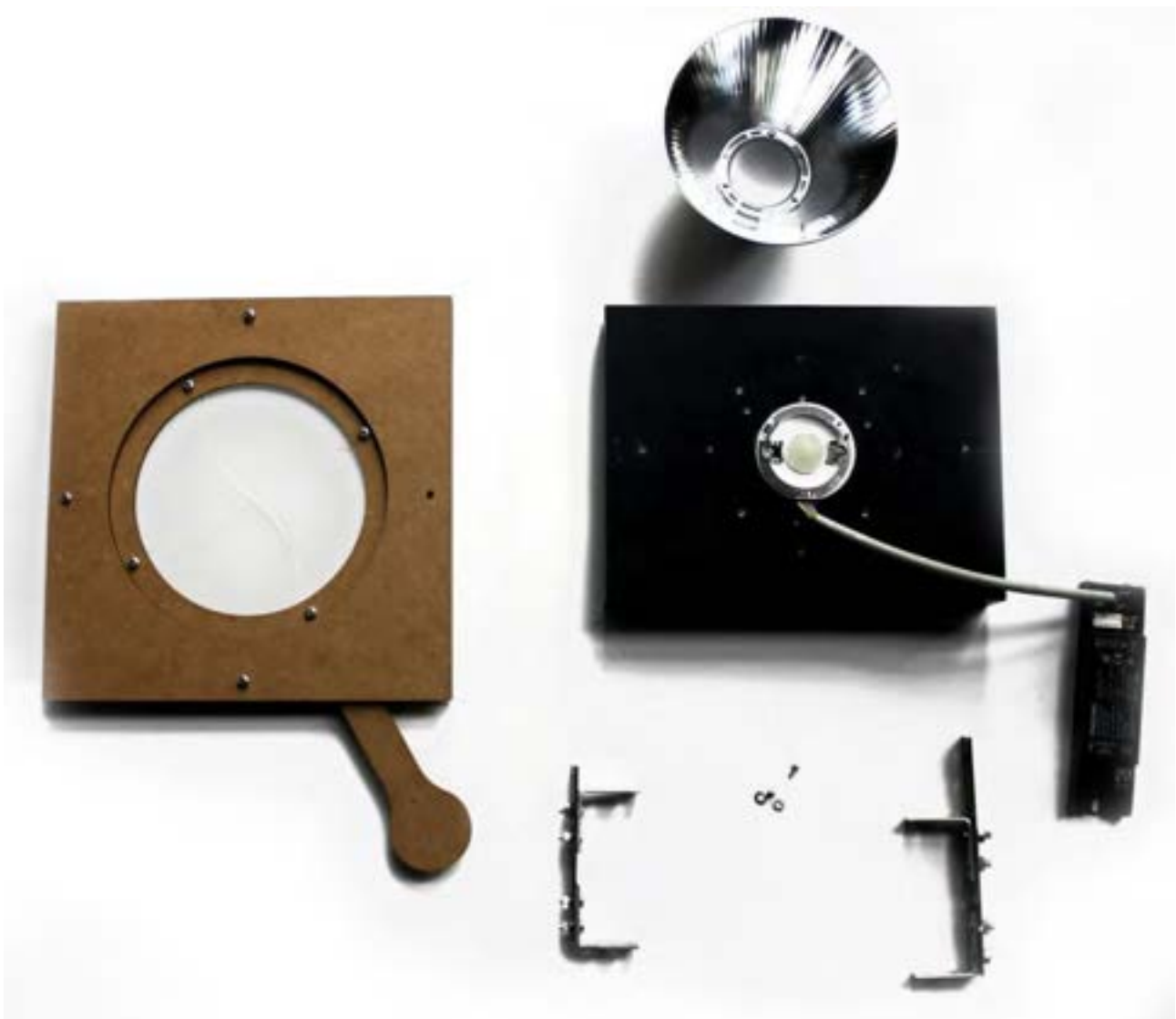


Figura 162 Componenti del prototipo che utilizza il modulo Tridonic Talex in combinazione con il riflettore LEDIL ANGELA-S e il diffusore olografico Luminit L80A6-16



**Figura 163 Soluzione 04: prototipo utilizzato per le misure di flusso (sistema completo e di ciascun componente) considerando le diverse posizioni del diaframma**

Le indicatrici di emissione del complesso modulo ibrido+riflettore (utilizzando il diffusore originale Tridonic) è riportato alla Figura 165, con un flusso emesso pari a 764.54 lm, all'interno di un'apertura di  $2 \times 8^\circ$  circa (questa apertura realizza il fascio narrow dell'apparecchio a luce localizzata).

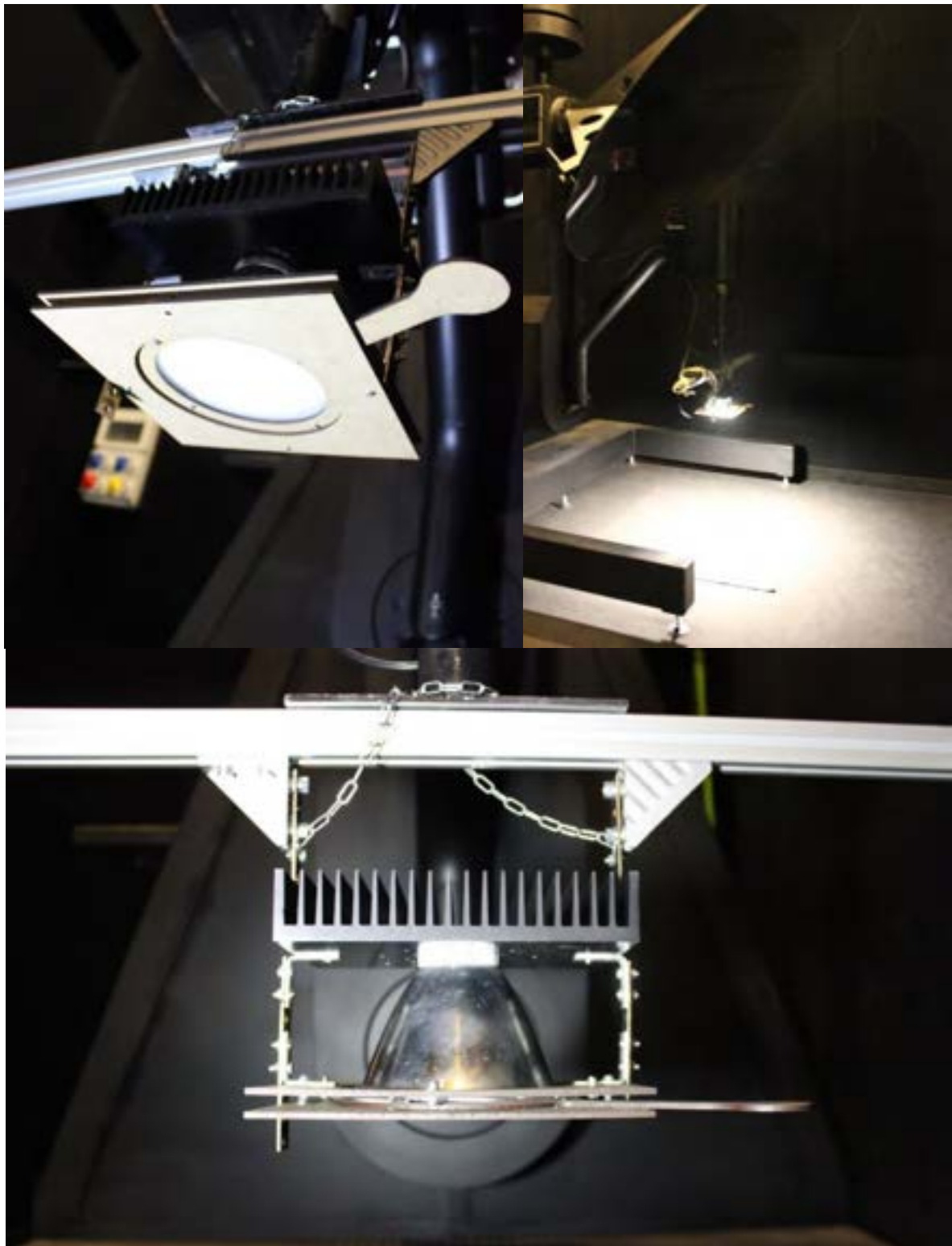


Figura 164 Soluzione 04 durante le verifiche fotometriche

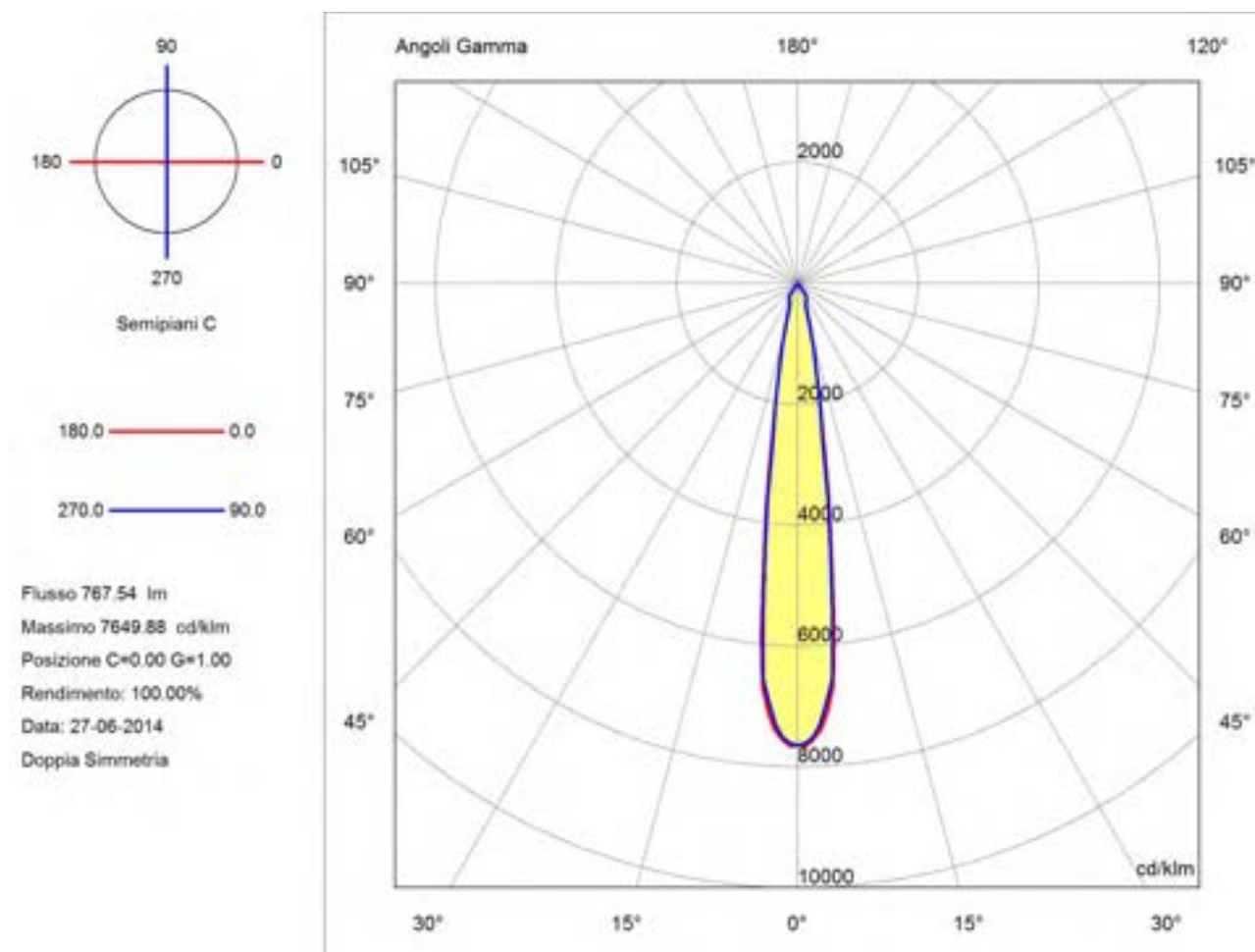


Figura 165 Indicatrici di emissione (C0-180° e C90-270°) del sistema composto dal modulo LED Tridonic Talex e dal riflettore ANGELA-S (F 13379): rappresenta l'emissione nella configurazione narrow

Per la realizzazione del fascio wide, si è ricorsi all'impiego di un diffusore olografico (Luminit L80A6-16) con una apertura nominale di 80°, posto di fronte al riflettore su di un piano perpendicolare all'asse di rivoluzione del riflettore stesso : le indicatrici di emissione misurate su un prototipo di studio sono quelle riportate alla Figura 166. In questo caso l'apertura del fascio risulta pari 2x43°, molto vicina la valore nominale indicato dal costruttore per il diffusore olografico, con flusso luminoso emesso pari a 557.21 lm Il rendimento ottico nella configurazione narrow risulta pari a 0.87, mentre quello relativo alla configurazione wide risulta pari a 0.63.

L'efficienza luminosa del modulo Tridonic risulta pari a 62.45 lm/W, in linea con quanto dichiarato dal costruttore del modulo, mentre l'efficienza luminosa dell'apparecchio nella configurazione narrow risulta pari a 764.54 lm/12.90 W=59.26 lm/W, mentre per il fascio narrow l'efficienza luminosa risulta pari a 557.21 lm/11.31 W=49.26 lm/W.

I valori di efficienza luminosa non troppo elevati di questa soluzione, sono in larga parte dipendenti dalle performance del modulo LED (63 lm/W<sup>49</sup> rispetto a 85 lm/W della soluzione precedente) e rappresenta il prezzo da pagare per poter disporre di un sistema di illuminazione a temperatura di colore variabile.

<sup>49</sup> Il valore risulta comprensivo delle perdite del sistema di alimentazione e regolazione della CCT

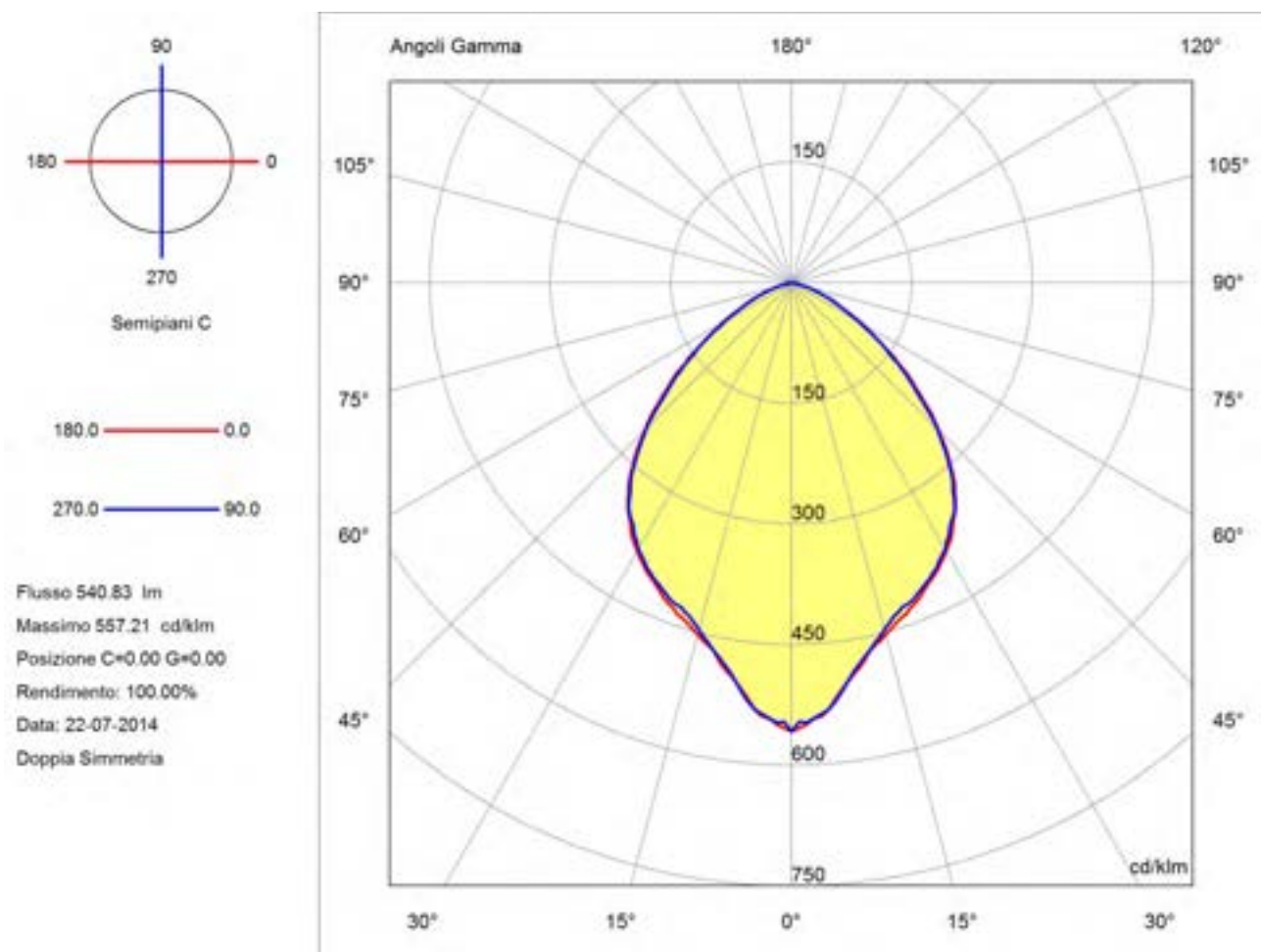


Figura 166 Indicatrici di emissione nei piani C=0-180° e C=90-270° dell'apparecchio nella configurazione wide

### 6.3 Misure colorimetriche

Al fine di valutare la qualità cromatica delle diverse soluzioni proposte, sono state eseguite delle misure spettrali dei diversi prototipi per differenti direzioni di osservazione.

Per quanto riguarda il prototipo 01, sono stati riportati i risultati di misura al limite dell'apertura del fascio stretto, per verificare che il sistema ottico con lente gonfiabile non comportasse un degrado delle proprietà di resa cromatica e cromaticità del fascio emesso.

Si riportano nel dettaglio le elaborazioni relative al solo caso pessimo (bordo dell'emissione luminosa), ottenute alimentando il dispositivo con una corrente costante pari a 350 mA.

I risultati di misura alla Figura 167 è riportata la distribuzione normalizzata dell'emissione della Soluzione 01, in configurazione del fascio narrow, osservato dalla direzione di 15° rispetto alla verticale (coincidente con l'asse ottico del dispositivo).

Alla Figura 168 è riportata la cromaticità, nelle medesime condizioni geometriche di misura, nello spazio colore (x,y) CIE 1931, dove il risultato della misura giace in posizione molto prossima al luogo Planckiano ed è coincidente con il centro dell'ellisse di MacAdams a 3 step.

Infine alla Figura 169, è riportato il grafico della gamut area, relativa ai campioni saturi dell'indice CQS, per la sorgente di riferimento (corpo nero alla temperatura di colore di 4008 K) e dell'emissione della Soluzione 01, osservata sotto un angolo di 15° rispetto all'asse ottico del sistema: il risultato è in linea con quello che ci si aspettava dall'emissione del solo LED (penalizzati i campioni Q8,Q9,Q10 in termini di saturazione, mentre si registra un suo aumento per i campioni Q4,Q5,Q6,Q7). Il valore della gamut area CQS, risulta pari a 1.001 a testimonianza del fatto che la riduzione di saturazione in corrispondenza ad alcuni campioni è compensata dall'aumento di tale parametro in altri.

Il valore dell'indice di resa cromatica CSQ risulta pari a 85, con il valore del campione Q1 (rosso profondo), pari a 78 (Figura 170) dovuto essenzialmente a una riduzione della saturazione; il valore dell'indice CIE Ra risulta pari a 84, con un valore dell'indice R9 pari a 29.

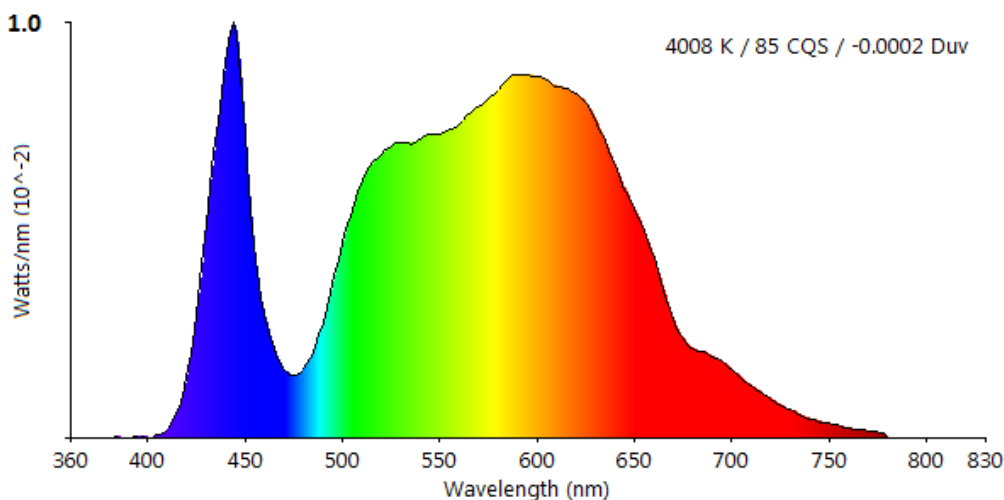


Figura 167 Spettro normalizzato relativo al prototipo 01, osservato secondo un angolo di 15° rispetto alla verticale

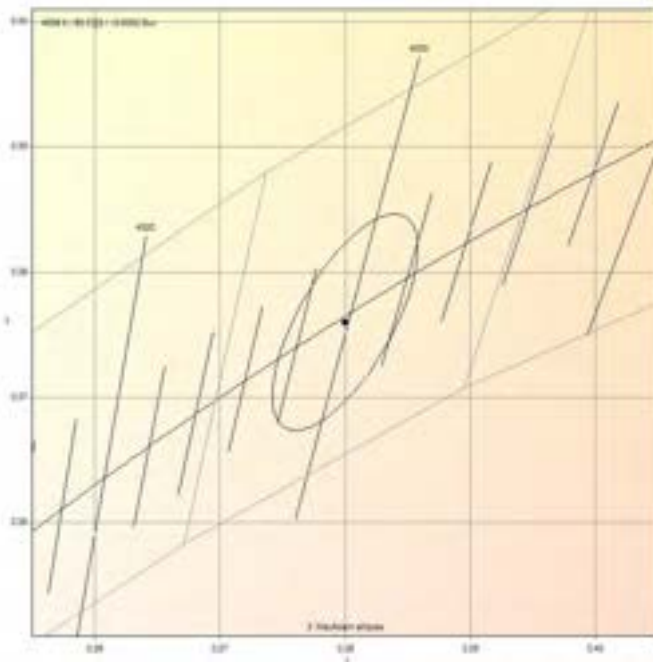


Figura 168 Coordinate cromatiche nello spazio CIE 1931 relative alla soluzione 01 (narrow) per una direzione di osservazione di 15° rispetto alla verticale

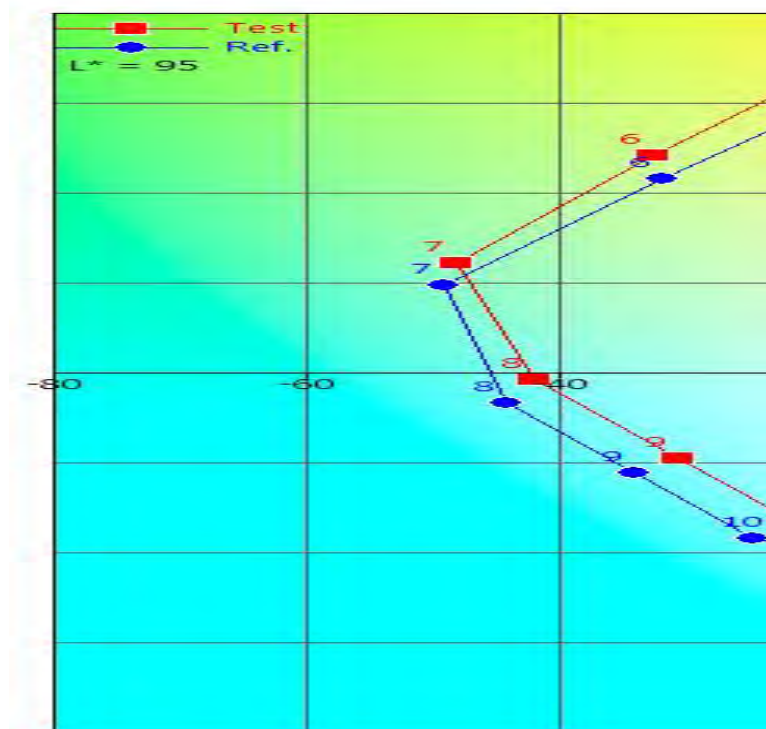


Figura 169 Gamut area campioni CQS, ottenuta utilizzando l'emissione spettrale in direzione 15° rispetto alla direzione verticale

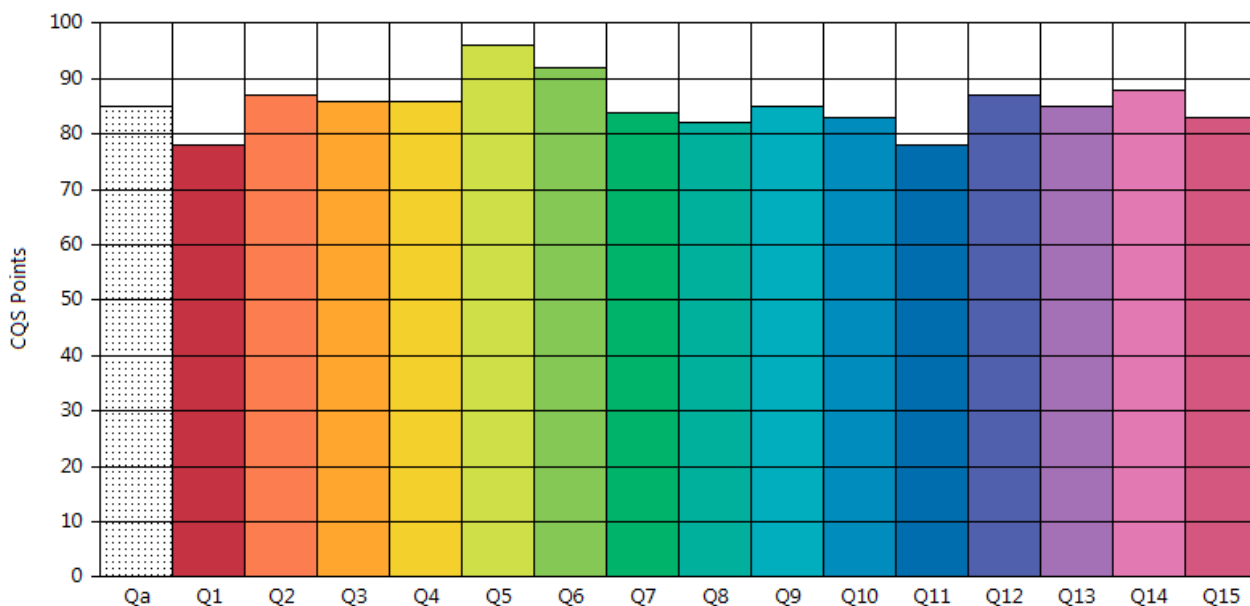


Figura 170 Indice CQS e dettaglio dei valori per ciascuno dei campioni saturi Q1...Q15. Per l’elaborazione si è utilizzata l’emissione spettrale in direzione 15° rispetto alla direzione verticale

Sono state successivamente condotte una serie di misure di campo vicino con lo scopo di valutare l’uniformità cromatica emessa dall’apparecchio su di uno schermo posto a 100 cm dal centro dell’apparecchio in modo tale da raccogliere il fascio luminoso contenuto all’interno della sua semi-apertura.

Il setup di misura è quello mostrato alla Figura 171: l’apparecchio completo è stato posto a 100 cm di distanza dallo schermo in modo tale che il suo asse ottico risultasse ortogonale allo target di rilevazione<sup>50</sup>.

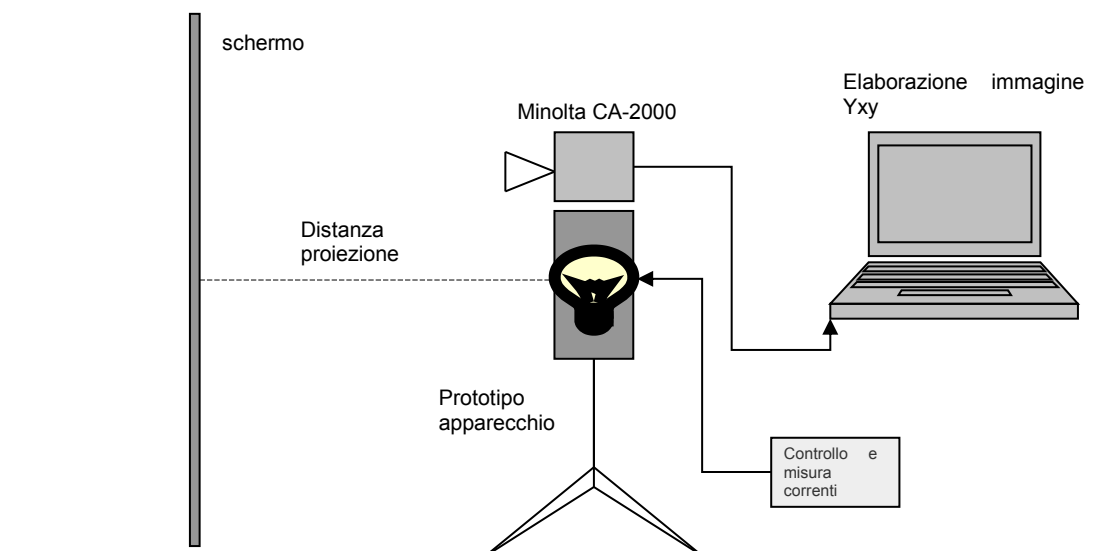


Figura 171 - Valutazione uniformità cromatica in campo vicino

L’apparecchio è stato alimentato a 350 mA, con lo stesso alimentatore lineare utilizzato per il rilievo fotometrico al goniofotometro.

<sup>50</sup> Il sistema di misura proposto è stato anche descritto e applicato nel seguente lavoro: Fulvio Musante and Maurizio Rossi “Colorimetry evaluation supporting the design of LED projectors for paintings lighting: a case study”, Journal of the International Colour Association (2012): 8, 44-54



Per la misura della mappa CCT prodotta dall'apparecchio sullo schermo è stato impiegato un video-colorimetro di produzione Minolta CA-2000, equipaggiato con obiettivo standard (Figura 172).



**Figura 172** Setup per la valutazione cromatica dell'emissione luminosa su uno schermo

Main Specifications CA-2000

Model	CA-2005L	CA-2005W	CA-2005T		
Light receptor	CCD image sensor (monochrome); 275-inch; Effective number of pixels: 1,000 x 1,000 pixels; Equipped with AFD filter (shock-resistant) and ND filter				
Lens	Interchangeable - Standard, wide, and telephoto lenses; Low-magnification and high-magnification macro rings for use with telephoto lens				
Measurement points (Resolution)	500 x 500 (Available in sets of 400 x 400 or 100 x 100 by using Data Management Software CA-220e)				
Color indication modes	370, 1,000, 1,000, True Color, and more; Evaluation points by control				
Display modes	Pseudocolor, RGB image, Chromaticity Diagram, Spot, 3D graph, Histogram, Nonuniformity enhancement, Cross section, Color difference, Multi-screen				
Measurement sizes (Length per side of square) (*)	Standard lens	Wide lens	Telephoto lens	WB low-magnification macro ring	WB high-magnification macro ring
	Approx. 30 m or more (depending on the distance)	Approx. 140 m or more (depending on the distance)	Approx. 110 m or more (depending on the distance)	Approx. 57m (Fixed)	Approx. 27m (Fixed)
Measurable size for typical measurement distances (side/distance)	1.1 m / 100 m Approx.	4.0 m / 100 m Approx.	1.0 m / 100 m Approx.	57 m / 100 m Approx. (Fixed)	27 m / 100 m Approx. (Fixed)
	44 cm / 1,000 m Approx.	30 cm / 1,000 m Approx.	25 cm / 2,000 m Approx.		
Measurement luminance range (including ND filter use)	0.1 - 100,000 cd/m <sup>2</sup>	0.1 - 100,000 cd/m <sup>2</sup>	0.5 - 100,000 cd/m <sup>2</sup>	0.5 - 100,000 cd/m <sup>2</sup>	0 - 100,000 cd/m <sup>2</sup>
	Single - Approx. 5 sec. or more; 4-line integration; Approx. 6 sec. or more; 16-line integration; Approx. 10 sec. or more; 64-line integration; Approx. 20 sec. or more; 256-line integration; Approx. 50 sec. or more				
Accuracy (*)	Luminance	±3 %	±3 %	±3 %	±3 %
	Chromaticity	±0.005	±0.005	±0.005	±0.005
Repeatability (*)	Luminance	±5 %	±5 %	±5 %	±5 %
	Chromaticity	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01
Inter-point error (*)	Luminance	±2 %	±2 %	±2 %	±2 %
	Chromaticity	±0.002	±0.002	±0.002	±0.002
Other functions	Luminance	±3 %	±3 %	±3 %	±3 %
	Chromaticity	±0.003	±0.003	±0.003	±0.003
Interface	USB 2.0 or higher				
Operating temperature and humidity range (†)	10-30°C, Relative humidity 70% or less/No condensation				
Storage temperature and humidity range (†)	0-30°C, Relative humidity 70% or less/No condensation; 20-20°C, Relative humidity 50% or less/No condensation				
Size	Body only	MC(W) x H x D (mm) (Height including handle: 211 mm)			
Weight	With lens and lens hood attached	224 (20) mm	224 (20) mm	224 (20) mm	224 (20) mm
Power source	3.5 Ag approx. (when standard lens and lens hood are attached)	AC adapter: 100-240 V ~, 1.2 A, 50-60Hz			
Standard accessories	Lens Hood	CA-A03	CA-A04	CA-A06	CA-A07
	Hard Cap	CA-A17	CA-A18	CA-A19	
	Calibration data DVD	Included with each lens			
	Other	Mount Cover CA-407, AC Adapter, USB Cable IF-A18, Data Management Software CA-220e			
Optional accessories	Soft Case CA-A01, Tripod CS-A3, Flat Head CS-A4, Calibration certificate				

\*1: Error in angle of view: 7%

\*2: Measurement time differs depending on brightness of measurement object, PC performance, and data processing contents.  
The specifications above were obtained under Konica-Minolta's measurement conditions shown below:  
PC's CPU : Pentium 4, 2.8GHz  
Data processing : Pseudocolor display of luminance data  
Resolution : 400 x 400  
Shutter speed : 1/50 sec. (1/50 sec. for measurement; 1/50 sec.)  
Measurement subject brightness: Standard/wide lens: Approx. 50 cd/m<sup>2</sup>; Telephoto lens: Approx. 200 cd/m<sup>2</sup>  
Low-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 400 cd/m<sup>2</sup>  
High-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 600 cd/m<sup>2</sup>

\*3: The measurement time becomes longer when the object is dark. The longest measurement time is approx. 10 seconds with 1-line integration, approx. 27 seconds with 4-line integration, approx. 50 seconds with 16-line integration, approx. 81 seconds with 64-line integration and approx. 164 seconds with 256-line integration.

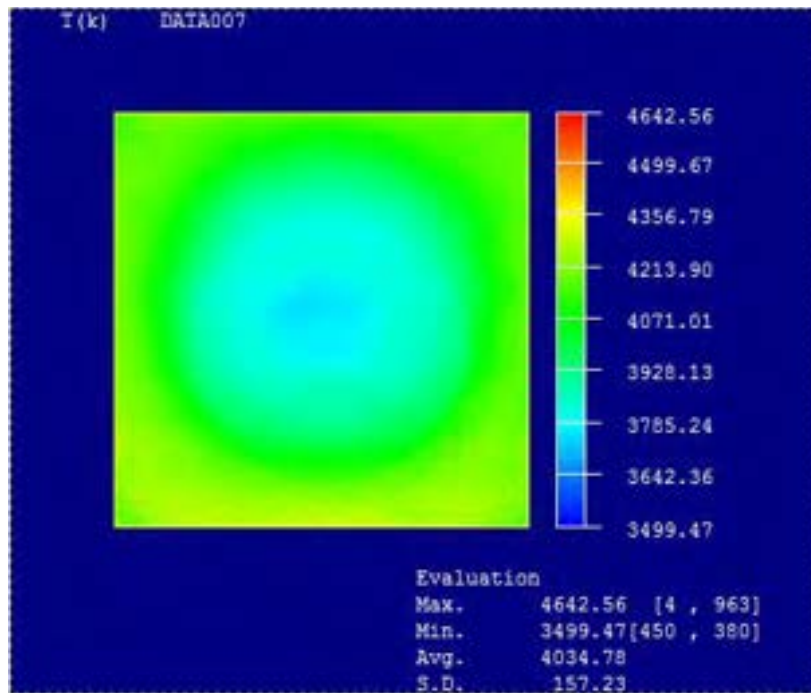
\*4: The specifications above were obtained under Konica-Minolta's measurement conditions shown below:  
Measurement subject brightness: Standard/wide lens: Approx. 30 cd/m<sup>2</sup>; Telephoto lens: Approx. 140 cd/m<sup>2</sup>  
Low-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 150 cd/m<sup>2</sup>  
High-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 250 cd/m<sup>2</sup>  
Distance: Minimum distance of each lens (evaluation): Based on the average obtained within 10% range at the center of the screen; Temperature: 23°C ± 2°C, Relative humidity: 40% ± 10%, Measuring light: White, reference light source; Integration: 64 lines (Normal mode)

\*5: The specifications above were obtained under Konica-Minolta's measurement conditions shown below:  
Measurement subject brightness: Standard/wide lens: Approx. 40 cd/m<sup>2</sup>; Telephoto lens: Approx. 100 cd/m<sup>2</sup>  
Low-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 200 cd/m<sup>2</sup>  
High-magnification macro ring and telephoto lens: Approx. 300 cd/m<sup>2</sup>  
Distance: Calibration: distance of each lens; Resolution: 100 x 100  
Evaluation (\*6): Based on the maximum/minimum values obtained in a square at the center of the screen measuring 60% of the height and width of the entire screen  
(\*7): Based on the maximum/minimum values obtained in the entire screen  
Temperature: 23°C ± 2°C, Relative humidity: 40% ± 10%, Measurement subject: White, reference light source; Integration: 64 lines (Normal mode)

\*6: Even if the instrument is stored within the specified usage (or storage) temperature/humidity range, the displayed value may change depending on long-period usage or storage conditions.

Figura 173 Caratteristiche tecniche dello strumento MINOLTA CA-2000

La Figura 174 mostra la distribuzione della CCT sullo schermo, rilevata dallo strumento: l'emissione incidente è per la maggior parte a 4100 K (verde) nella zona periferica del fascio, con delle zone a minor temperatura di colore (3650 K) nella parte centrale del fascio. Al fine di dettagliare meglio i risultati all'interno dell'apertura del fascio, sono stati inseriti sulla mappa CCT una serie di spot di misura, all'interno dei quali sono stati valutati le coordinate cromatiche nello spazio colore CIE (x,y) 1931 e i relativi valori di luminanza (Figura 175).

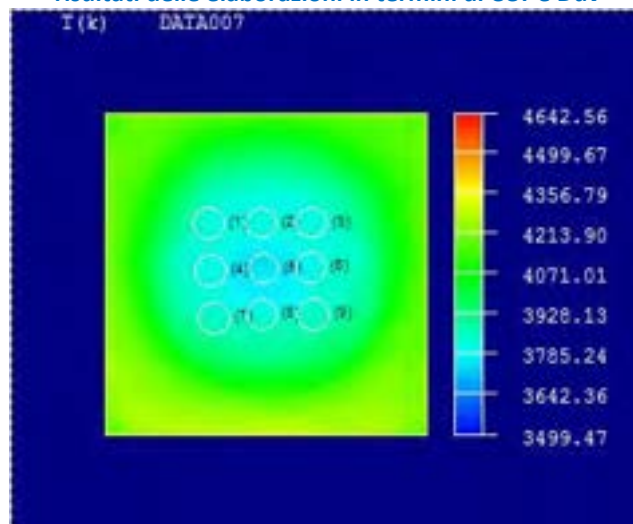


**Figura 174** Mappa CCT prototipo 01, corrispondente alla regolazione del fascio narrow

La posizione degli spot di misura all'interno della mappa a falsi colori è riportata alla Figura 176, mentre alla Figura 177 è riportata la posizione delle cromaticità dei 9 spot nel diagramma cromatico CIE (x,y) (1931), dove si osserva che tutti i valori sono contenuti in un ellisse di MacAdam a 3 step.

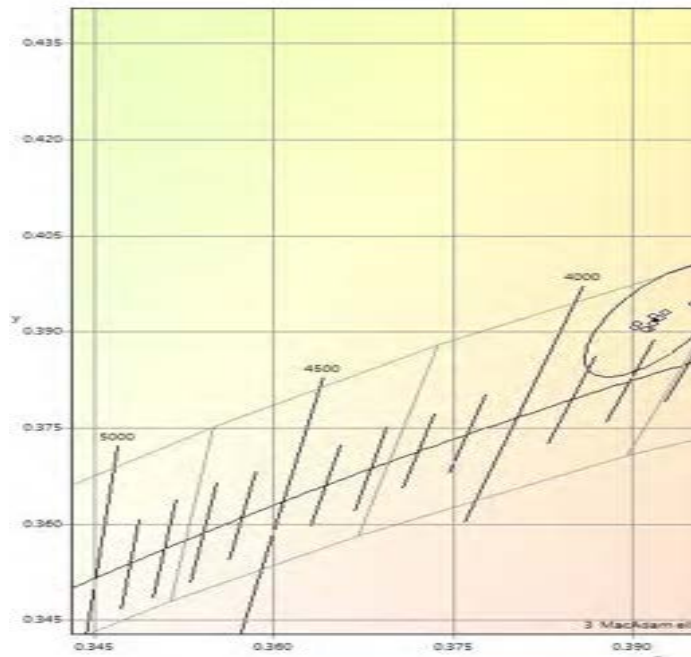
No	x	y	Lv(cd/m <sup>2</sup> )	CCT (K)	Duv
1	0.3911	0.3903	1274.006	3826	0.0032
2	0.3918	0.3912	1813.906	3816	0.0035
3	0.3915	0.3904	1593.958	3817	0.0032
4	0.3923	0.3922	1318.039	3811	0.0038
5	0.3951	0.3943	1171.063	3760	0.004
6	0.3927	0.393	1426.55	3807	0.004
7	0.3903	0.3907	1001.42	3849	0.0036
8	0.3918	0.3925	1075.821	3825	0.004
9	0.3904	0.3913	1112.001	3850	0.0039

**Figura 175** Spot di misura per la valutazione dell'uniformità cromatica all'interno del fascio di emissione: risultati delle elaborazioni in termini di CCT e Duv



**Figura 176** Posizione degli spot di misura all'interno della mappa a falsi colori

Sulla base dei risultati precedenti, possiamo affermare che l'uniformità cromatica all'interno dell'apertura del fascio sia adeguata all'applicazione.



**Figura 177 Cromaticità degli spot di misura all'interno del diagramma cromatico CIE (x,y) 1931**

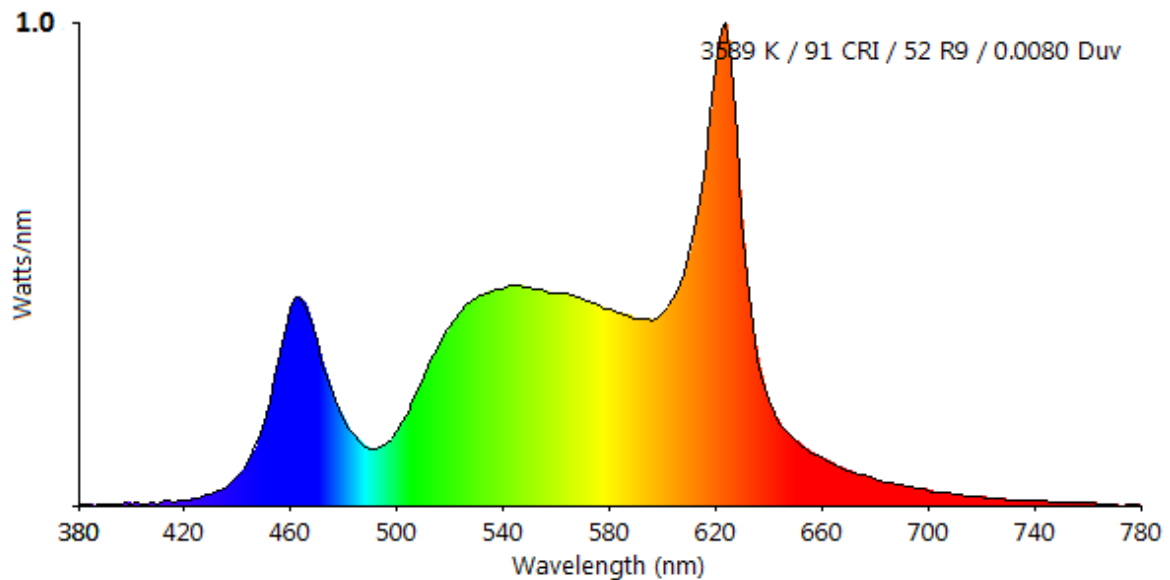
La soluzione 03, che differisce dalla precedente per la scelta del sistema di collimazione del fascio emesso dal LED, presenta prestazioni e performance in linea con quelle della soluzione descritta in precedenza; più interessante risulta invece la soluzione 04 con il modulo a temperatura di colore variabile, dove si sono osservate delle differenze sostanziali a seconda che venisse impiegato il diffusore originale TRIDONIC o il color mixer di produzione LEDIL.

La Figura 178 mostra l'immagine della proiezione del fascio stretto ottenuta accoppiando il modulo Tridonic al miscelatore LEDIL : appaiono evidenti degli anelli rossastri e una scarsa uniformità della proiezione che ha portato alla conclusione di non utilizzare questo componente (miscelatore) per lo sviluppo successivo del prototipo di studio.



**Figura 178 Soluzione 03 con miscelatore LEDIL e riflettore LEDIL ANGELA-S**

La distribuzione spettrale misurata in asse per la Soluzione 04 (con emissione del fascio narrow) è riportata alla Figura 179: si osserva che l'indice di resa cromatica CIE Ra risulta pari a 91, con un valore dell'indice speciale R9 (rosso saturo) decisamente più elevato rispetto a quello delle soluzioni 01 e 02.



**Figura 179 Distribuzione spettrale, misurata in asse, del prototipo 03 (diffusore TRIDONIC)**

I dettagli degli indici speciali per CQS e CIE Ra sono riportati alle Figura 180 e Figura 181.

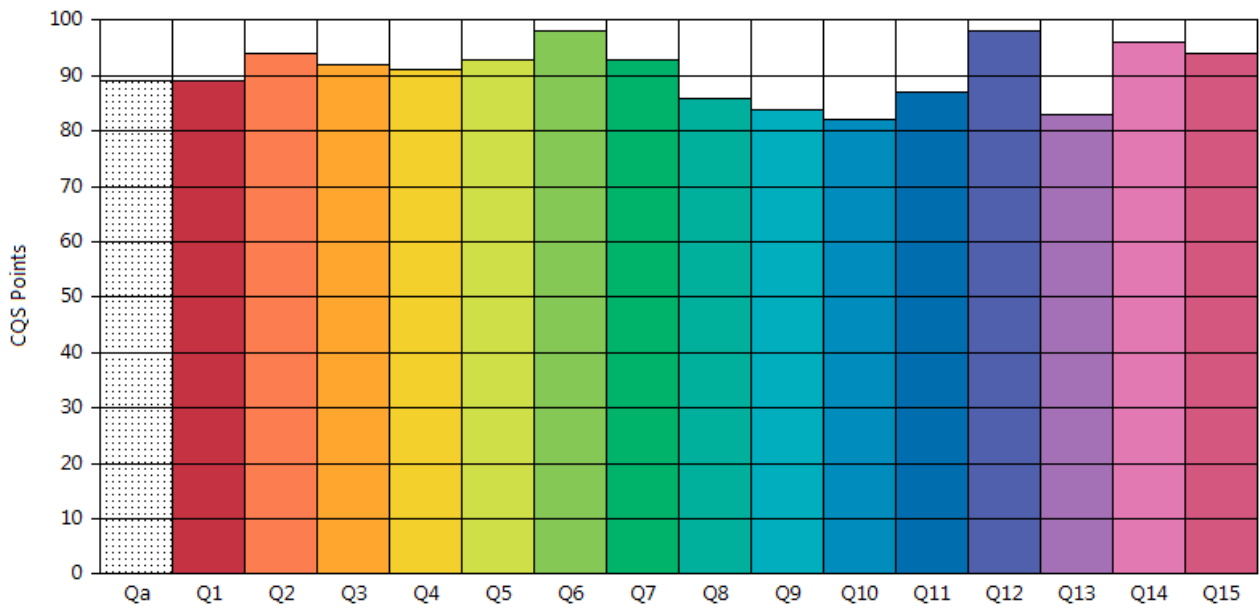


Figura 180 Indice CQS e dettaglio dei valori per ciascuno dei campioni saturi Q1...Q15. Per l'elaborazione si è utilizzata l'emissione spettrale in asse

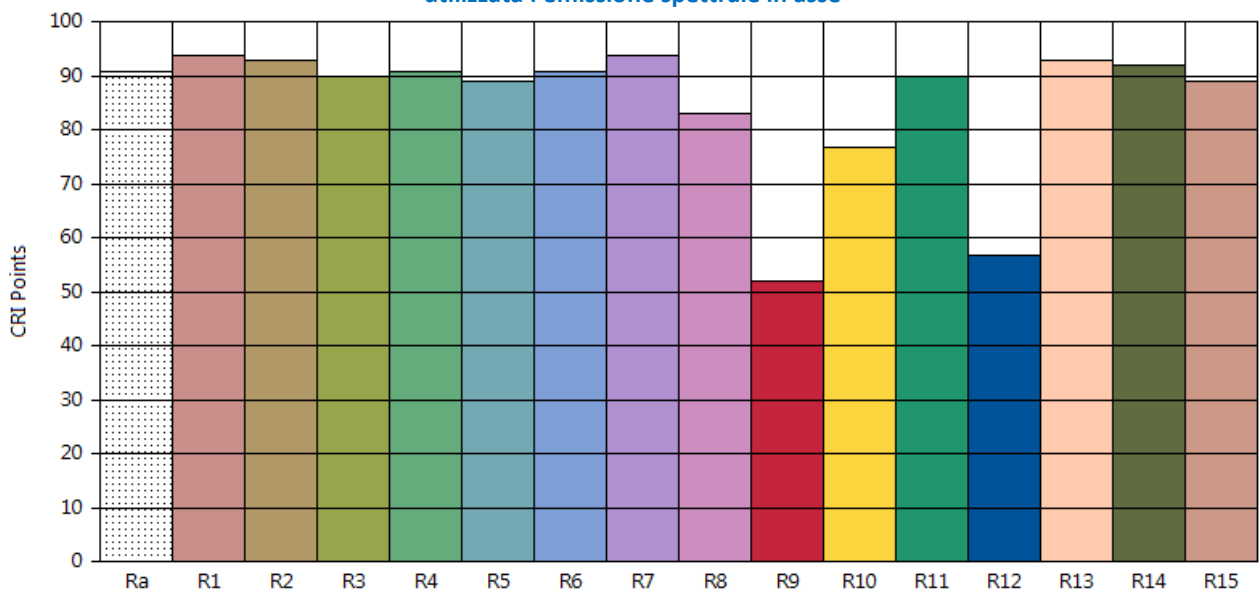


Figura 181 Indice CIE CRI e dettaglio dei valori per ciascuno dei campioni saturi R1...R15. Per l'elaborazione si è utilizzata l'emissione spettrale in asse

Per quanto riguarda la cromaticità, si osserva che la temperatura correlata di colore risulta leggermente più bassa rispetto alle soluzioni esaminate in precedenza e appare evidente una maggiore lontananza della cromaticità emessa rispetto al luogo Planckiano (confronta con la Figura 182).

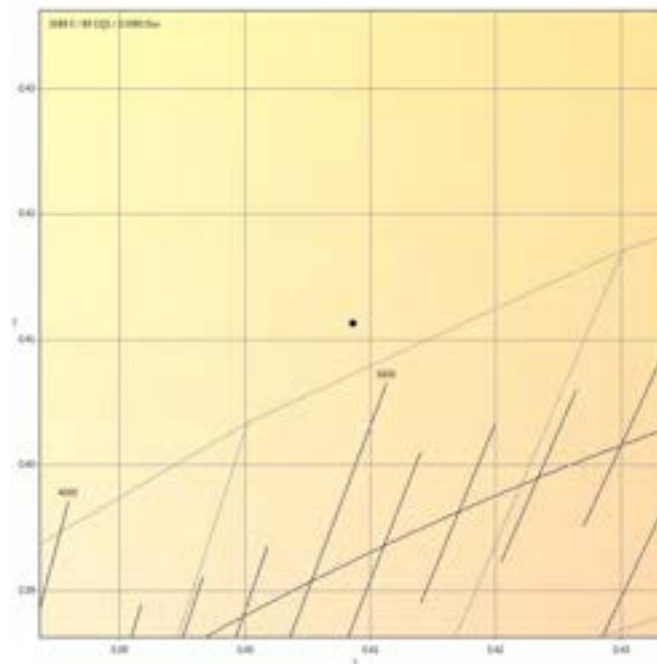


Figura 182 Cromaticità del modulo TRIDONIC e riflettore LEDIL ANGELA-S che realizza una emissione narrow

## 7 Allegato A: Schede casi studio

### 7.1 *Interacting with Lighting Innovations*

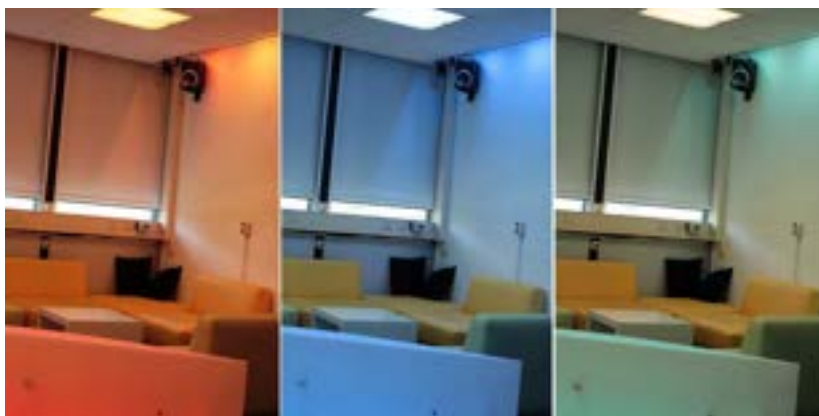
**Anno:** Gennaio – Luglio 2013

**Team di progettazione:** studenti e ricercatori della Technische Universiteit di Eindhoven

**Progetto di ricerca:** finalizzato alla esplorazione dell'esperienza di interazione degli utenti in termini di comprensibilità, preferenza e semplicità del controllo dell'illuminazione

#### **Interazione**

- **Utenti (chi):** studenti, professori (range di età compreso tra i 20 e i 50 anni)
- **Contesto applicativo (dove):** stanza/laboratorio per meeting informali collocata all'interno dell'Università all'Intelligent Lighting Institute<sup>56</sup> equipaggiata con apparecchi di illuminazione a LED



**Figura 183 stanza/laboratorio con apparecchi di illuminazione a LED presso l'università di Eindhoven Intelligent Lighting Institute**

- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Cct (temperatura di colore)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Animazione/dinamica luminosa
- **Motivazioni di controllo (perché)**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

#### **Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:**

- SUI, interazione utente attraverso un supporto superficiale
- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

#### **Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:**

- attivo
- autonomo | manuale | ibrido
- naturale | astratto | metaforico

#### **Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità**

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI



In particolare le interfacce tattili progettate hanno esplorato diversi concept: da sistemi più tradizionali, come ad esempio una serie di interruttori a corda inseriti a sospensione dal soffitto ciascuno in relazione ad un elemento della stanza, a sistemi più complessi come una console con manopole per la gestione differenziata di diversi apparecchi posti nella scena, oppure elementi più giocosi e metaforici tra cui un cubo in cui ogni faccia rappresenta un concetto di illuminazione e il cui orientamento permette di modificare l'illuminazione globale della stanza per scenari preimpostati, e un interruttore a parete morbido che può essere accarezzato o colpito per aumentare di colpo o diminuire in maniera graduale la luce dell'intero spazio.



### **Risultati sperimentali di ricerca**

La ricerca si è focalizzata sulle modalità con cui gli utenti utilizzavano i controlli sia mediante il controllo libero di scenari luminosi nella stanza, sia mediante la selezione tra scenari luminosi diversi ma preimpostati. È stato rilevato che, nella maggior parte dei casi, gli utenti ritengono molto più importante la sensazione di controllo ottenuta durante l'interazione piuttosto che gli eventuali feedback del sistema di illuminazione. Al fine di creare questa sensazione di controllo e personalizzazione, i sistemi in cui sia visibile in maniera evidente il cambiamento in termini di feedback luminoso ma anche nel sistema stesso di controllo sono preferibili e preferiti. Inoltre, i controlli in cui appaia una scala o una gradazione sono preferiti rispetto a sistemi on/off. Inoltre, l'esperimento ha dimostrato che gli utenti sono piuttosto disinteressati nel modificare l'illuminazione di un sistema complesso all'interno della stanza, perdendo subito l'interesse di interagire con il sistema a causa di comportamenti non chiari, strani o non direttamente evidenti tra controllo e feedback luminoso. È fondamentale inoltre che l'interfaccia rappresenti in maniera chiara le informazioni del feedback luminoso che si vanno a manipolare senza creare particolari difficoltà nella comprensione dell'utente (ad esempio la saturazione e la tinta).

## 7.2 Ambient Data

Anno: 2012

Team di progettazione: studente di design della Parsons University (Adiel Fernandez<sup>57</sup>)

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** pensato per un contesto domestico
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Animazione/dinamica luminosa
  - Quantità delle luci controllate (distribuzione luminosa)



Figura 184 Scultura luminosa e parametri di illuminazione controllati

- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (informazioni)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione
  - Socializzazione

Questa scultura luminosa<sup>58</sup> è un esempio di illuminazione interattiva in grado di mostrare a livello visivo e tramite l'illuminazione colorata dei singoli elementi le previsioni meteo. In particolare, nella modalità lettura meteo, la luce si colora di rosso o di ciano se la temperatura è rispettivamente alta o bassa e viene avvisato l'utente della probabilità di precipitazioni piovose attraverso una luminescenza blu di alcune luci.

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale



L'interfaccia tangibile è in forma di cubo sulle cui facce sono state poste delle icone riferite alle condizioni di illuminazione che possono essere variate. Il cubo interattivo è stato equipaggiato da un giroscopio, un accelerometro, un'antenna radio XBee e una batteria a polimeri di litio. Ruotando le sue facce verrà realizzata la scena di luce che viene rappresentata in alto. Il cubo interpreta gesti semplici, intuitivi per permettere all'utente di controllare la luce: scuotendolo, il cubo passa da uno stato di stand-by ad uno

stato attivo, l'icona fiamma determina un comportamento delle luci come fossero candele (flickering). In questa modalità, la rotazione in senso orario permette di aumentare il numero di luci controllate mentre viceversa, in senso antiorario le luci accese vengono diminuite.

**Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:**

- attivo
- autonomo | manuale
- naturale | astratto

**Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità**

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI

### 7.3 Moodlight

**Anno:** 2014

**Team di progettazione:** Jaime Snyder, Mark Matthews, Lindsay Reynolds, Emily Sun, Jacqueline Chien, Adam Shih, Jonathan Lee del Dipartimento di Information Science presso la Cornell University Ithaca, NY<sup>59</sup>  
<sup>60</sup>

**Progetto di ricerca:** set up di ricerca volta a sperimentare gli effetti di un sistema di illuminazione ambientale che utilizza l'illuminazione colorata per inviare dei feedback luminosi visivi all'utente sul suo stato di stress incoraggiando la riflessione e l'auto coscienza del proprio status emotivo al fine di mitigarne gli effetti negativi. La ricerca è strutturata sotto forma di design probe è volta ad indagare il potenziale che hanno sistemi di illuminazione interattivi nel facilitare pratiche volte al benessere.

#### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** laboratorio/ ufficio testato in ambito universitario
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionale (benessere e informazione)
  - Socializzazione (se il sistema è usato in coppia, in giochi del tipo "relax to win")

#### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

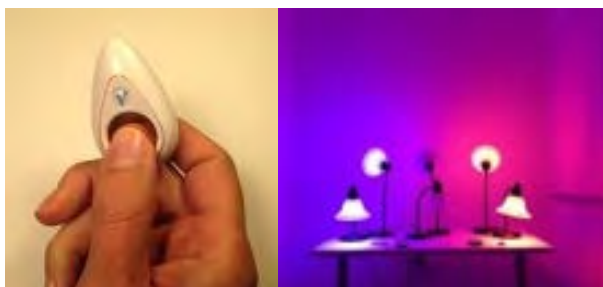
- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

#### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- passivo | attivo
- manuale
- astratto

#### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI



**Figura 185 Sistema Moodlight: apparecchi di illuminazione equipaggiati dalle lampadine Philips Hue e il sensore di lettura dello stress**

Il sistema di illuminazione è basato sul sistema di illuminazione interattivo di Philips HUE è stato integrato ad una serie di prodotti (task light) la cui performance luminosa è controllata tramite un sensore di attività elettrodermica (EDA) che dunque legge i dati biometrici sullo status di arousal degli individui. Tale informazione viene inviata via bluetooth ad un sistema Android che a sua volta invia le informazioni rielaborate alle lampadine a LED: l'informazione biometrica viene tradotta in informazione digitale, modificando il colore dell'illuminazione.

#### Risultati sperimentali di ricerca



**Figura 186 Esempi di interfaccia tangibile sull'apparecchio stesso di illuminazione**

Una serie di situazioni e di studi sperimentali (design probe) sono stati condotti al fine di testare l'esperienza dei partecipanti nella gestione dello stress tramite la sua visualizzazione luminosa volta sia alla presa di coscienza del proprio status emotivo, sia mirata al raggiungimento del rilassamento. In alcuni casi sono stati sperimentati anche giochi competitivi del tipo "relax to win".

I risultati dei test di osservazione sul comportamento dei partecipanti e le seguenti interviste di tipo qualitativo hanno evidenziato l'importanza della visualizzazione del proprio status emotivo attraverso l'illuminazione con effetti sia negativi che positivi. In particolare, in alcuni casi, la visualizzazione pubblica del proprio status emotivo non era particolarmente apprezzata, mettendo in discussione l'importanza di mantenere la propria privacy in contesti pubblici. In altri casi la rappresentazione luminosa del proprio status emotivo ha sortito l'effetto sperato, ovvero quello di invitare i partecipanti al rilassamento mediante le tecniche di respirazione. La visione del colore dell'illuminazione legata ad un particolare status emotivo si è dimostrata correlata con il credere realmente che questo fosse la rappresentazione dello status emotivo: il sistema di conversione cromatica e luminosa del proprio stress o rilassamento attraverso dati biometrici era dunque ritenuto credibile. Inoltre la codificazione cromatica dell'illuminazione (rosso per lo status di stress o arousal e blu per uno status di rilassamento) si è dimostrata correlata. Diversamente gli altri colori intermedi sono stati interpretati in maniera eterogenea dai partecipanti.

## 7.4 Fonckel

Anno:2010

**Team di progettazione:** Philip Ross (TU/e Eindhoven)<sup>61 62</sup>

**Progetto di ricerca:** la ricerca e lo sviluppo di un prodotto di illuminazione si è focalizzato sulla creazione di comportamenti estetici e virtuosi nella relazione tra l'individuo e l'oggetto di luce. In particolare, si è studiata in maniera approfondita l'interazione con la luce con gestualità che forniscano piacere e siano espressive e funzionali, arricchendo l'esperienza delle persone nel modificare la luce.

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** domestico per attività di tipo lettura su tavolo, scrivania, living room e a letto
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Accensione e spegnimento
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio, zoom)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale



### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- metaforico

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI

L'inserimento di una serie di sensori sulla parte superiore della scocca dell'apparecchio permette il controllo della luce dei singoli LEDs inseriti simulando un fascio di luce che si muove all'interno di un contenitore seguendo i gesti dell'utente. In particolare l'accensione avviene sfiorando il sistema dalla base verso la parte superiore, il orientamento del fascio segue esattamente la posizione della mano che accarezza il dorso della lampada, l'apertura del fascio deriva dall'aprire e chiudere due dita mentre l'aumento e la diminuzione della luminosità deriva dalla rotazione della mano.

## 7.5 X&Y

Anno: 2011

Team di progettazione: Flynn Talbot<sup>63</sup>

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** domestico
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione



X&Y<sup>64</sup> è un prodotto interattivo di illuminazione in forma di sfera opalina che emette un'illuminazione colorata e modificabile in tinta e luminosità ruotando la sfera stessa rispetto all'asse orizzontale X (colore) e verticale Y (luminosità).

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- metaforico

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI

Tale sistema di interfaccia tattile permette di creare un'esperienza di luce personale e sensoriale, incoraggiando l'utente a partecipare nella scelta dell'atmosfera luminosa dell'ambiente attraverso una gestualità elegante e giocosa. Il design del prodotto risulta volutamente minimale focalizzando l'attenzione sull'effetto luminoso nella parte sottostante della sfera di vetro opale e sul modo in cui avviene l'interazione con l'utente.

## 7.6 Apparecchi di illuminazione interattivi: Seide Light, Air Light e Water Light

Anno: 2011

Team di progettazione: Viktor Kolbig<sup>65</sup>

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** prevalentemente domestico
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

In particolare, i tre prototipi di lampade sono accomunati da nuove modalità di interazione e controllo della luce da parte dell'utente, esplorando in particolare gestualità e ritualità poetiche.

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale
- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- metaforico

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI (esempio Seide light)



La lampada Seide light è coperta di una superficie morbida in tessuto: la luce viene controllata in base al modo in cui viene toccata: un tocco più profondo determina una maggiore luminosità mentre una carezza della superficie determina lo spegnimento.

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI (esempio Water Light)





Water light consiste in una base che emette luce su cui può essere poggiato un contenitore (bicchiere) in cui versate l'acqua che non solo diventa il mezzo attraverso il quale la luce si diffonde ma anche la modalità attraverso cui la luce viene controllata. Infatti, la luce si accende mettendo un dito nell'acqua e può essere modificata facendo girare il dito. Diversamente il movimento di due dita genera onde nel liquido che consentono di avere effetti dinamici della luce riflessa dall'acqua.

- Gestualità nell'interazione spaziale (esempio Air light)



Air light è un'oggetto luminoso a forma di anello che si accende senza contatto diretto, inserendo la propria mano al suo interno. Il colore della luce si modifica in base al modo in cui la mano viene ruotata e inserita all'interno dello stesso.

## 7.7 Forgetmenot

**Anno:** 2011

**Team di progettazione:** Pleasurable troublemakers (Matthias Laschke, Marc Hassenzahl e Sarah Diefenbach della Folkwang University of the Arts)<sup>66 67</sup>

**Progetto di ricerca:** Studiata e progettata per incentivare comportamenti virtuosi, rivelare problematiche o aspetti su cui riflettere e aumentare aspetti di autocontrollo.

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** domestico
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (informazione)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- passivo | attivo
- manuale
- naturale

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI



“Forget Me Not” è una lampada da lettura che fa sentire la sua presenza. Dopo essere stata accesa, la lampada si chiude lentamente come un fiore, oscurando la sua luce nel tempo. Toccando uno dei suoi petali, la lampada si riapre per risplendere di nuovo: tramite questo gesto si crea un dialogo costante tra l'utente e la lampada che porta a riflettere da un lato sul controllo e quindi la limitatezza delle risorse e dunque anche la responsabilità di farne un uso appropriato.

## 7.8 Area e Rima

Anno: 2011

Team di progettazione: Dreipuls<sup>68</sup>

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** ambiti di lavoro come uffici o scrivanie domestiche, piani di lavoro di cucine o applicazioni simili in contesti di lavoro
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale
- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- naturale

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI (esempio Rima)



Rima è un prodotto di illuminazione il cui controllo luminoso dipende da quattro anelli che possono essere facilmente fatti scorrere lungo la barra per controllare la luce ovvero accenderla e spegnerla completamente oppure limitarla in una porzione di spazio della scrivania.

- Gestualità nell'interazione spaziale: attiva (esempio Area)



In maniera molto simile ma senza contatto diretto funziona Area, un modulo di illuminazione la cui distribuzione lineare può essere attivata, disattivata e parzializzata ponendo la mano sotto l'apparecchio senza toccarlo. Una matrice di sensori posta in corrispondenza di ogni singolo LED è in grado di rilevare la posizione della mano e attivare il singolo LED, attraverso una mimica naturale dei movimenti utilizzati per afferrare, trascinare e spingere.

## 7.9 Sense and Simplicity

Anno: 2004

Team di progettazione: Philips Lighting

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** prevalentemente domestico
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa e comportamento di interazione)
  - Personalizzazione

I prototipi realizzati sotto forma di probe si focalizzano sulla creazione di nuove esperienze di interazione personale con l'illuminazione nella dimensione quotidiana che possano conciliare l'estetica del gesto espressivo e affettivo nel controllo della luce.

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

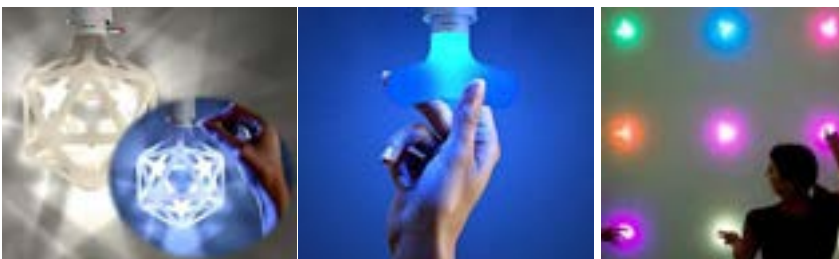
- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale
- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- naturale | astratto | metaforico

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI (esempio Light Bulbs)



### Light Bulbs

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI (Chameleon)



Chameleon è un paralume che cambia colore in base al colore dell'elemento che gli viene mostrato (con un sensore interposto nella parte frontale dello stelo)

- Gestualità nell'interazione spaziale: attiva (Philips Light Chimes)



Philips Light Chimes è in grado di sentire i cambiamenti di vento e temperature (prodotti sia dal vento sia dal soffio di un utente) e tradurli in un interessante pattern di luce mutevole colorata.

## 7.10 Timid interactive lamp

Anno: 2011

**Team di progettazione:** Tanja Steinebach and Erik Wedeward studenti presso la Köln International School of Design, Cologne<sup>69 70</sup>

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** non definito
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- metaforico

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Gestualità nell'interazione spaziale: attiva



Lampada prototipo che dimostra le possibilità di controllare l'illuminazione in maniera meccanica senza contatto diretto, ovvero attraverso un sensore che riconosce la posizione della mano ed è in grado, grazie al movimento vero l'alto o verso il basso di movimentare l'apparecchio stesso al fine di dimmerare la luce. Il prototipo è stato realizzato mediante la board di Arduino (con un kit preparato basato sulla SensorAktor Shield<sup>71</sup>) che ha permesso di prototipare l'interfaccia gestuale di controllo dell'illuminazione più personale: estraendo la testa luminosa si ha più luce, spingendola dentro la stessa si dimmerà e poi si spegne.

### 7.11 Leap Motion Controller

Anno: 2014

Team di progettazione: Leap Motion Company<sup>72</sup>

#### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** -
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Informazioni digitali
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Personalizzazione

#### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

#### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- naturale

#### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Gestualità nell'interazione spaziale: attiva



Si tratta di un sistema che permette di monitorare il movimento e la posizione delle mani e tradurre il movimento naturale ( o appreso) delle stesse in informazioni digitali che al momento sono utilizzate per gestire diverse applicazioni ma che potrebbero essere tradotte anche nella gestione dell'illuminazione.

## 7.12 Luceplan Ottowatt, Ascent Table

Anno: 2011– 2013

Team di progettazione: Alberto Meda , Paolo Rizzato e Daniel Rybakken

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** domestico e ufficio
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso) (Ascent Table)
  - Cct (temperatura di colore) (Ottowatt)
  - Distribuzione luminosa (distribuzione del fascio) (Ascent Table)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- astratto | metaforico

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI



La sorgente LED dimmerabile permette di variare a piacere tra luce bianca calda o fredda tramite la rotazione dell'elemento diffondente.



Essenziale nell'aspetto, sofisticato per la tecnologia, concettuale per come esprime la sua idea di luce, Ascent è un oggetto ad alto contenuto poetico, a metà strada tra cuore e ragione. La novità fondamentale risiede nel gesto inedito con cui si accende, si regola la sua intensità di luce e la si spegne: si tratta di un



movimento verticale, con cui si fa scorrere il piccolo paralume lungo lo stelo sottile con un movimento fluido e continuo, dall'alto verso il basso e viceversa. Un gesto inusuale di interazione che determina un dimming molto puntuale grazie al collocamento della scheda elettronica nella testa: i circuiti presenti sullo stelo trasmettono gli input al microprocessore che interpreta il cambio di stato della lampada emettendo, di conseguenza, diversi gradi di luce.

### 7.13 Room-e Frog

Anno: 2012

Team di progettazione: Frog Design<sup>73</sup>

#### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** domestico, lavorativo e ufficio
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Cct (temperatura di colore)
  - Animazione/dinamica luminosa
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere, informazioni)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

#### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)
- Interazione vocale (audio)

#### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- ibrido
- naturale | astratto | metaforico

#### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Gestualità nell'interazione spaziale: attiva



Per mostrare e prototipare la tecnologia emergente di riconoscimento vocale e gestuale, Frog Design ha creato uno spazio sperimentale in cui i computer scompaiono e le capacità digitali sono estese nell'ambiente fisico. I feedback di questa interazione prevalentemente gestuale sono modificazioni luminose, sonore e proiezioni di display.

Room-E si basa su una modalità di comunicazione con l'ambiente in maniera naturale e intuitiva basata sull'uso di proiettori, luci intelligenti, microfoni e Microsoft Kinects. Ad esempio dicendo "Luci" mentre si punta con il dito verso un apparecchio, Room-E risponde ai comandi e anche al contesto: ad esempio la luce si trasforma, mentre gli oggetti mossi sul tavolo determinano il cambiamento della proiezione di luce e immagini sul tavolo stesso. Questa consapevolezza rispetto al contesto rende le interazioni più veloci e più facili, richiedendo meno input da parte dell'utente. La mancanza di un dispositivo fisico da controllare libera l'utente di interagire con l'ambiente naturale.

## 7.14 Artemide Scrittura

Anno: 2014

Team di progettazione: Artemide (Carlotta de Bevilacqua e Laura Pessoni)

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):**
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Cct (temperatura di colore)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione
  - Socializzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- SUI, interazione utente attraverso un supporto superficiale
- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- ibrido
- naturale | astratto | metaforico

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Gestualità nell'interazione spaziale: attiva | performativa

Scrittura segna un cambiamento di paradigma nell'uso del colore e della temperatura di colore della luce attraverso l'impiego di sorgenti LED di ultima generazione. Due componenti a forma di L, una strutturale di alluminio e una ottica di metacrilato, danno vita ad un oggetto che descrive lo spazio attraverso la luce e si manifesta come segno grafico luminoso. In colore bianco e rgb, la luce di Scrittura viene declinata in due diverse performance, asimmetrica quando è scenografia pura radente a parete e diffondente ad emissione simmetrica e controllata nella versione bianca. Scrittura può essere controllata per mezzo di tecnologie di ultima generazione: un comando Hand Gestic a distanza ravvicinata per mezzo di gesti semplici, intuitivi e codificati da un circuito a bordo dell'apparecchio.



- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI e SUI

In alternativa l'interazione avviene attraverso web app utilizzabile su smartphone, tablet, pc con qualsiasi sistema operativo, System DALI e DMX. Con entrambe le modalità di controllo è possibile accendere,

spegnere, dimmerare l'intera scenografia o i singoli moduli che la compongono con la possibilità di scegliere il punto colore desiderato per la versione rgb.



### 7.15 Toshiba

Anno: 2014

Team di progettazione: Toshiba<sup>74</sup>

#### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** spazio lavorativo di tipo ufficio, spazio commerciale e spazi pubblici
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

#### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

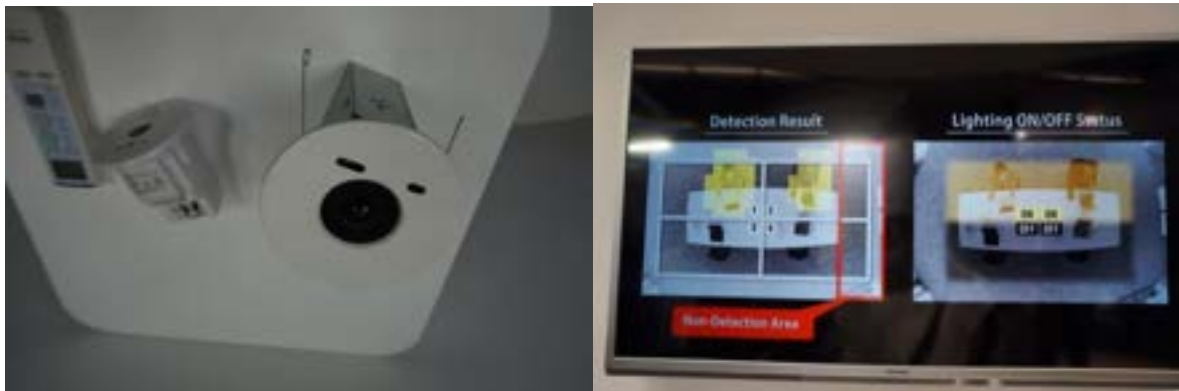
- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture-based)

#### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- ibrido
- naturale

#### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Gestualità nell'interazione spaziale: passiva



Il Sistema è basato su una camera con sensore CMOS in grado di monitorare i più piccoli movimenti delle persone e quindi evitare lo spegnimento del sistema di illuminazione in situazioni di stasi. Oltre a questo il sistema di monitoraggio è sensibile a diverse zone.

## 7.16 Ambienti

Anno: 2012

**Team di progettazione:** gruppo di ingegneri, design ed esperti del settore lighting fondato ad Eindhoven<sup>75</sup>

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** spazi ampi come uffici, stanze per conferenze, alberghi, lobbies e altre specifiche funzioni (ad esempio uno studio fotografico)
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Animazione/dinamica luminosa
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- SUI, interazione utente attraverso un supporto superficiale
- Interazione attraverso un telecomando
- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- naturale

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità



Le piastrelle Ambienti, costituite da 64 LEDs su una griglia di 8x8, sono in grado di essere controllate da un'interazione interattiva intelligente. Ogni singola piastrella luminosa è equipaggiata da Bluetooth e/o Wi-Fi. L'interazione può avvenire tramite un'interfaccia tattile gestibile su

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce SUI (smartphone o tablet)
- Gestualità nell'interazione spaziale: attiva mediante un telecomando "point&play control" per un controllo semplice, intuitivo e diretto.

In entrambi i casi le scene possono essere memorizzate per essere condivise e/o richiamate successivamente

### 7.17 *Species of Illumination series*

**Anno:** 2014

**Team di progettazione:** Bob de Graaf <sup>76</sup>

#### **Interazione**

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** domestico
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Animazione/dinamica luminosa
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)

Sistema costituito da due lampade in grado di muoversi autonomamente e di determinare pattern luminosi.

#### **Motivazioni di controllo (perché):**

- Funzionali (visione, benessere)
- Personalizzazione
- Socializzazione

#### **Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:**

- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

#### **Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:**

- passivo | attivo
- ibrido
- naturale | metaforico

#### **Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità**

- Gestualità nell'interazione spaziale: passiva | attiva | performativa

In particolare:



Wallace, un sistema di illuminazione a sospensione caratterizzato da una testa mobile e da un cavo snodabile che gli permette di essere movimentato, utilizza sensori per muoversi alla ricerca continua di punti non illuminati della stanza per renderli più luminosi. Il sistema è completamente autonomo.<sup>77</sup> Darwin, è una lampada da tavolo che utilizza l'energia solare per auto-ricaricarsi durante il giorno andando in giro per la stanza alla ricerca di luce (equipaggiata con ruote per muoversi liberamente). La sera la lampada si muove nella casa alla ricerca di persone (seguendo il movimento di una mano) accompagnandole nei percorsi e nelle attività con il suo fascio di luce.

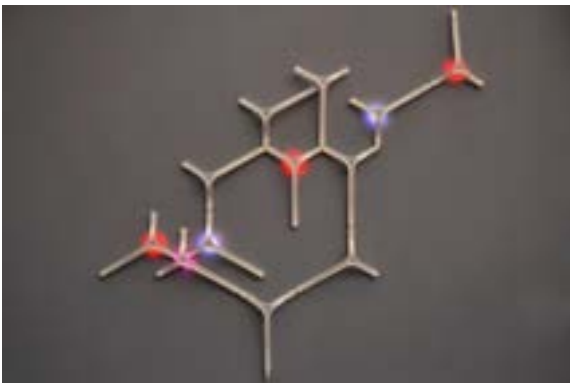
## 7.18 Waelice

Anno: 2012

Team di progettazione: Nodesign<sup>78</sup> (studio francese)

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** -
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)



- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

Sistema modulare di illuminazione da parete stampato mediante prototipazione rapida (sinterizzazione) che si focalizza concettualmente sull'idea di empatia con lo spazio.

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- SUI, interazione utente attraverso un supporto superficiale
- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- astratto

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

Ogni elemento del sistema modulare è equipaggiato con un indirizzo IP che consente all'utente di modificare l'illuminazione (intensità e colore) di ciascun nodo dando la possibilità di personalizzare la performance luminosa sia



- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce SUI (tablet o smartphone)





- Gestualità nell'interazione spaziale: attiva e performativa tramite il riconoscimento del movimento delle mani (con sensori integrati in ciascun nodo)

## 7.19 Clyde

Anno: 2013

Team di progettazione: Fabule, un'azienda di design Canadese <sup>79</sup>

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** domestico
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Animazione/dinamica luminosa
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

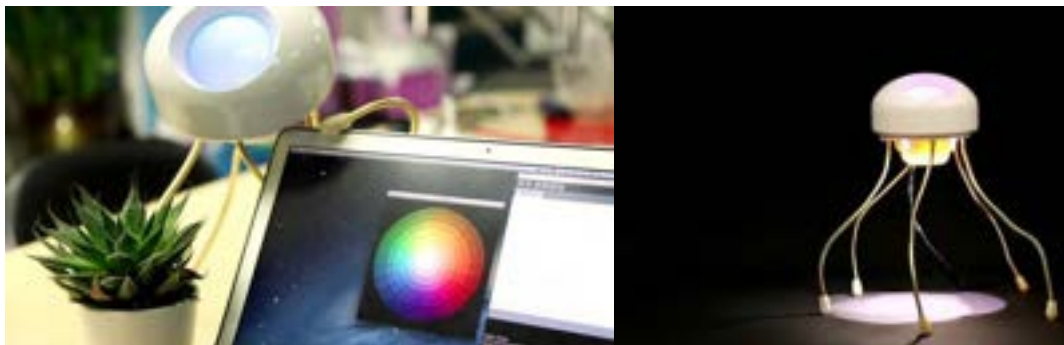
- passivo | attivo
- ibrido
- metaforico

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI

Gestualità nell'interazione spaziale: passiva | attiva | performativa

Definita come "a lamp with a lot of personality that you can adapt, play with, and truly call your own", Clyde è una lampada da tavolo che può essere programmata con moduli ottimizzati per la personalizzazione ovvero in grado di reagire rispetto a stimoli ambientali e rispetto all'utente. Utilizzando Arduino come software, la lampada è programmata per rispondere con diverse scene di luce (colore e intensità) rispetto a determinate condizioni. Nella modalità "Afraid of the dark", Clyde si accende in base a quanto buia è la stanza. Nella modalità "touchy feely", Clyde si accende di colori diversi che ciclanò quando l'utente tocca le sue gambe flessibili. <sup>80</sup>



## 7.20 Goodnightlamp

Anno: 2013-2014

Team di progettazione: <sup>81</sup>

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque con particolare riferimento a familiari che vivono distanti
- **Contesto applicativo (dove):** domestico
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Animazione/dinamica luminosa
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (informazione)
  - Socializzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

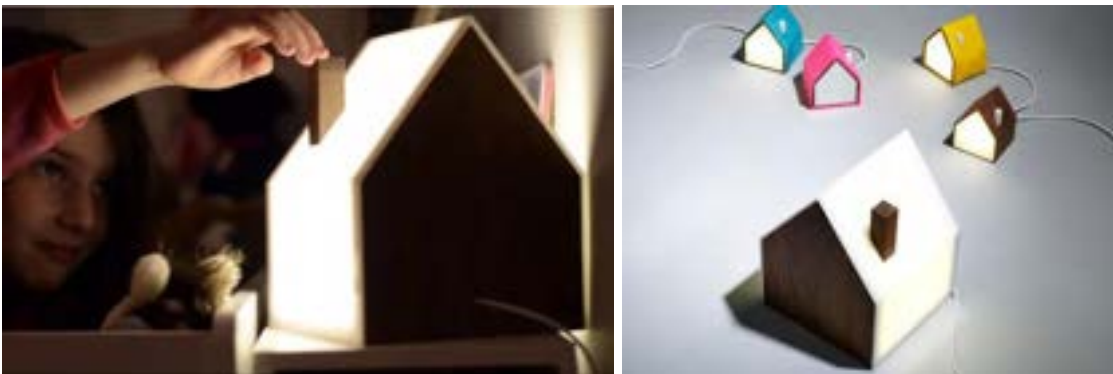
- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- passivo | attivo
- ibrido
- metaforico

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI



Si tratta di una serie di apparecchi di illuminazione dalla forma iconica che, attraverso la connessione internet si collegano automaticamente ai parenti familiari e amici di chi le possiede agendo da visualizzatore di un social network. In particolare, chi possiede e mette in funzione la lampada più grande (attraverso un interruttore inserito sul comignolo della stessa, anche i piccoli elementi di illuminazione collocati nelle case dei congiunti situate in tutto il mondo si accendono. L'idea è dunque di visualizzare la connessione tra congiunti che vivono lontani per diversi motivi segnalando per esempio quando si è in casa, quando sta andando a dormire o quando sta uscendo dall'ufficio.

## 7.21 Telecomando di LivingColors Philips

Anno: 2005-2012

Team di progettazione: Philips<sup>82 83</sup>



### Interazione

- **Utenti (chi):-**
- **Contesto applicativo (dove): -**
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- Interazione attraverso un telecomando

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- astratto

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI ovvero un telecomando



Il controllo dei diversi parametri di illuminazione è racchiuso all'interno di un controllo semplice la cui interfaccia è intuitiva e semplice. Il controllo e mixaggio dei colori è garantito dal controllo touch di una ruota colorata. Altri bottoni sensibili permettono di modificare l'intensità e la saturazione del colore (16 milioni di effetti di illuminazione colorata).

## 7.22 Throne

Anno: 2013-2014

Team di progettazione: i-Camp, un'azienda di sviluppo e ingegnerizzazione russa<sup>84</sup>

### Interazione

- **Utenti (chi):** utenti esperti per la programmazione del sistema di illuminazione (e modellazione del 3D) sia utilizzatori finali dell'illuminazione e degli altri sistemi
- **Contesto applicativo (dove):** contesti di medie/ampie dimensioni come ambienti pubblici di ospitalità come alberghi e teatri, retail, lavoro come ufficio e industriale
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Cct (temperatura di colore)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Animazione / dinamica luminosa
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate)
  - Selezione di scene luminose predefinite
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- SUi, interazione utente attraverso un supporto superficiale

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- ibrido
- naturale

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce SUi come tablet o sistemi a muro (del tipo Advantech)

Si autodefinisce la prima interfaccia di controllo basata su un modello 3D e controlla contemporaneamente l'illuminazione, il clima interno e la sicurezza, interfacciandosi con diversi sistemi di differenti brand e aziende attraverso i più comuni standard di comunicazione come KNX / EIB, HDL Bus, TELETASK. L'utilizzo di una visualizzazione tridimensionale dello spazio permette la possibilità di facile comprensione del sistema attraverso un'interfaccia intuitiva e semplice da gestire. L'interazione con il modello 3D semplificato permette di ruotare, spostare, ingrandire e rimpicciolire il modello, di modificare il cursore e le icone relative alle differenti funzioni di illuminazione, sicurezza e climatizzazione. Per la creazione dei modelli 3D da parte de manager dell'illuminazione è stata definita una procedura per cui si raccomanda l'utilizzo dell'editor di SketchUp di cui vengono forniti tutorial e istruzioni<sup>85</sup>. La gestione avviene in maniera remota attraverso un computer (Throne server) e attraverso un sistema di controllo basato su tablet o smart phone che abbiano installato l'applicazione Throne e che si connetta al singolo punto di accesso tramite una connessione VPN. Per i sistemi di tipo industriale viene consigliato l'utilizzo di touch-panels di Advantech.



I controlli che riguardano la luce consentono di gestire l'intero complesso oppure singole aree o stanze tramite accensioni e spegnimenti, variazioni di quantità di luce (dimming) e di colore dell'illuminazione RGB, la scelta di scene di luce pre-programmate (impostando e memorizzando dei preset) attivabili manualmente attraverso l'applicazione Throne su tablet. Allo stesso modo, l'installazione di specifici sensori come telecamere o sensori di movimento e presenza possono attivare sia l'illuminazione che gli allarmi. Il sistema permette di visualizzare in tempo reale sul tablet le riprese delle telecamere di sorveglianza installate.



## 7.23 VIA

Anno: 2012

Team di progettazione: [86](#)

### Interazione

- **Utenti (chi):** cinque
- **Contesto applicativo (dove):** qualunque
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Cct (temperatura di colore)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Animazione/dinamica luminosa
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate)
  - Selezione di scene luminose prestabilite
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- GUI, interazione utente attraverso un supporto grafico
- SUI, interazione utente attraverso un supporto superficiale

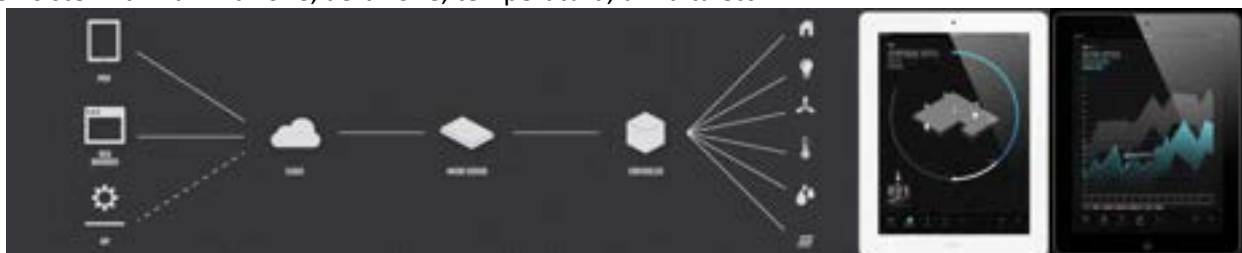
### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- passivo | attivo
- ibrido
- naturale

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce SUI

Basato sulla cloud e costruito sugli standard di connessione KNX, BACnet, Modbus è in grado di interagire con sistemi di illuminazione, aerazione, temperatura, umidità etc.



## 7.24 Eyeon

Anno: 2011

Team di progettazione: Digital Habits

### Interazione

- **Utenti (chi):**
- **Contesto applicativo (dove):**
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Cct (temperatura di colore)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Animazione/dinamica luminosa
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- SUI, interazione utente attraverso un supporto superficiale

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- passivo | attivo
- ibrido
- naturale

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce SUI

Utilizza il software Konnex per i sistemi di home automation.





## 7.25 One

Anno: 2014

Team di progettazione: Digital Habits per Comelit

### Interazione

- **Utenti (chi):**
- **Contesto applicativo (dove):**
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- SUI, interazione utente attraverso un supporto superficiale

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- passivo | attivo
- ibrido
- astratto

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce SUI



One è un'interfaccia tattile su superficie per il controllo della luce, del colore, della temperatura, del suono e di tutte le automazioni domestiche attraverso un unico elemento che è equipaggiato con un'interfaccia dinamica che si modifica in base alle funzioni da controllare. Il sistema è gestibile attraverso touch-control: scorrendo il dito da destra verso sinistra (e vice versa) l'interfaccia cambia pagina e funzionalità di controllo. La pressione prolungata su un comando provvede a fornire all'utente controlli e informazioni avanzate mentre la rotazione del dito aumenta o diminuisce l'intensità, la temperatura etc.

## 7.26 Lirio, Lucebar Series

Anno:-

Team di progettazione: Lirio, Philips<sup>87</sup>

### Interazione

- **Utenti (chi):** -
- **Contesto applicativo (dove):** -
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione



### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- naturale

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI attraverso la rotazione dell'anello posizionato nella parte centrale dell'apparecchio

### 7.27 Pupa Lamp

Anno: 2005 - 2006

Team di progettazione: Progetto25zero1<sup>88 89</sup>

#### Interazione

- **Utenti (chi):-**
- **Contesto applicativo (dove): -**
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Personalizzazione

#### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

#### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- metaforico

#### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI (accarezzamento)



## 7.28 Philips research for an office lighting

**Anno:** 2011

**Team di progettazione:** Koen van Boerdonk, Jon Mason, Dzmitry Aliakseyeu (Philips Research Europe, 5656 Eindhoven, The Netherlands)<sup>90</sup>

**Scopo della ricerca:** stabilire quali parametri di illuminazione e in che modo gli utenti di un ufficio desiderino modificarli

### Interazione

- **Utenti (chi):** lavoratori di un ufficio (impiegati)
- **Contesto applicativo (dove):** ufficio



- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Cct (temperatura di colore)
  - Distribuzione luminosa (distribuzione del fascio)

Lo studio è stato effettuato utilizzando un proiettore integrato nelle sorgenti le cui capacità luminose sono state stabilite per poter simulare l'illuminazione da ufficio desiderata nei diversi scenari di interazione.

- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale
- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- naturale | astratto

### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'apparecchio: manipolazione e gestualità dell'interfaccia TUI



Basata su una serie di scenari preimpostati in cui tutti i parametri sono modificabili simultaneamente al fine di definire uno scenario luminoso. La modifica dell'illuminazione avviene attraverso l'interazione diretta con una maniglia che può essere ruotata secondo un arco di 180° e, in relazione all'angolo selezionato vengono scelte diverse scene di luce: calma, neutrale, energetica e produttiva. Nonostante le quattro differenti scene di illuminazione, se l'utente ruota la maniglia nelle posizioni intermedie, otterrà un'illuminazione intermedia tra le due.

- Gestualità nell'interazione spaziale: attiva



In questa interazione l'utente può selezionare i parametri di illuminazione singolarmente (flusso, temperatura di colore e distribuzione dell'illuminazione) mediante la selezione degli stessi toccando la scrivania su cui vengono proiettati i comandi uno di seguito all'altro.

#### **Risultati della ricerca**

Lo studio ha rivelato che l'ufficio ideale dovrebbe essere capace di garantire un'illuminazione consona al lavoro e personalizzabile soprattutto in termini di distribuzione del fascio, ovvero mediante un fascio di luce che sia in grado di illuminare l'intera superficie della scrivania o parti di essa, di livelli di illuminamento e di temperatura colore del bianco. I partecipanti allo studio non si sono mostrati interessati ad avere un'illuminazione colorata o a diversificare il fascio, ad esempio da rettangolare a tondo, oppure ad avere fasci di illuminazione multipli. Inoltre, da uno studio preliminare è risultato che il controllo dell'illuminazione per gli utenti di un ufficio deve essere il più semplice e veloce possibile. Comparando le due interfacce in base alla preferenza dei partecipanti nell'uso a lungo termine del sistema di illuminazione è risultato che gli utenti preferiscono il controllo individuale di parametri luminosi (precisione) piuttosto che il controllo di scene predefinite (astrazione), desiderando inoltre poter memorizzare i propri scenari per poterli richiamare in seguito. Durante le interviste sono stati identificati alcuni fattori che influenzano la preferenza degli utenti: il tempo per selezionare la luce, la facilità di interazione, la qualità delle condizioni di illuminazione iniziale per un compito specifico.

## 7.29 Goldee Light Controller

Anno: 2013

### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** domestico
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Diverse scene di illuminazione preimpostate: acceso, spento, in comunicazione con smart phones e altri smart devices, benvenuto a casa, buongiorno (sveglia) buonanotte (illuminazione per dormire) illuminazione di ispirazione, modalità notturna, scenari per differenti atmosfere luminose (tipo aurora etc), scenari per la sicurezza che illuminano l'interno come se i proprietari fossero in casa.



- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- SUI, interazione utente attraverso un supporto superficiale (eventualmente anche tramite smartphone)
- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- ibrido
- astratto



### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce SUI

### 7.30 Nod Ring

Anno: 2014

Team di progettazione: Nod Inc <sup>91</sup>



#### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** ovunque
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Altro: tutti i device smart
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

#### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

#### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- naturale

#### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Gestualità nell'interazione spaziale: attiva

Indossare l'anello permette di controllare diversi sistemi smart domestici e non interagendo con gesti naturali ed intuitive come ruotare monopole, sfogliare pagine, cliccare, diminuire l'illuminazione senza toccare alcun controllo fisico.

### 7.31 M-Beam

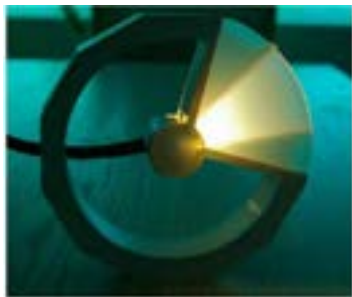
Anno:2012

Team di progettazione: Westerhoff Ontwerp, Tokyo, Japan e Philips Research, Eindhoven, The Netherlands

92

#### Interazione

- **Utenti (chi):** -
- **Contesto applicativo (dove):** -
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)



- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

#### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

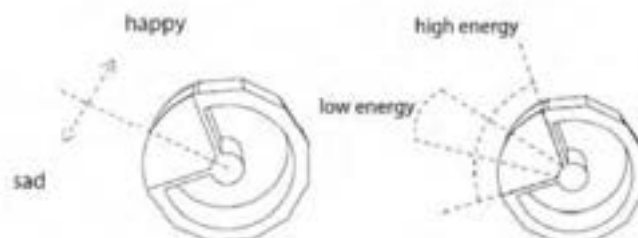
- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale

#### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- astratto

#### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI



Selezionando una posizione dell'interfaccia tangibile, l'utente seleziona il mood dell'illuminazione. L'interfaccia stessa consiste in un elemento che emette luce e co-esiste con il sistema di creazione dell'atmosfera. La sua forma è circolare angolata con un'apertura che emette la luce: ruotando l'elemento per la creazione dell'atmosfera luminosa e ampliando il fascio, l'espressione dell'oggetto stesso si modifica.



### 7.32 HueMotion controller

**Anno:** 2014

**Team di progettazione:** studenti di interaction design dell'Università di Eindhoven (Rik Bootsman, Svetlana Mironcika, Ineke Neutelings and Mart Wetzels)<sup>93</sup>

**Progetto di ricerca:** Durante il modulo 'Designing with complex sensors' hanno lavorato sulla creazione di un prototipo che interagisse in maniera tangibile con alcune lampade Hue di Philips creando un prototipo fisico per investigare nuove modalità di interazione con interfacce TUI. Il sistema è stato investigato sia dal punto di vista dell'utente sia dal punto di vista del funzionamento con un approfondimento sul rapporto reciproco tra i due sistemi soprattutto nelle funzioni di comunicazione e informazione.

#### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** -
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

#### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- TUI, interazione utente attraverso un supporto tangibile tridimensionale attraverso:



La rotazione della manopola superiore che permette di modificare il colore della luce: ruotandola, una ruota di colori appare mostrando all'utente quale dei colori sia stato selezionato mentre, mostrando un'informazione di feedback, la manopola diventa del colore selezionato



Il movimento del sistema permette di modificare il flusso luminoso e la saturazione del colore selezionato secondo due assi che determinano quattro aree: elevata - limitata luminosità (asse Y) massima - minima saturazione (asse X). Come feedback visivo il riferimento luminoso viene proiettato nella parte inferiore del sistema



La pressione del pulsante nella manopola rotante permette di selezionare la specifica lampada che si vuole attivare: premendo una volta la prima lampadina inizierà a emettere luce come anche la manopola stessa comunicando che i due sistemi sono connessi. Premendo nuovamente la manopola viene selezionata un'altra lampada.

**Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:**

- attivo
- manuale
- astratto

**Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità**

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce TUI



Il Sistema disegnato e progettato permette di creare un'interfaccia altamente comunicativa tra il sistema di illuminazione e il soggetto mediante un elemento fisico studiato per poter rendere l'interazione giocosa trasmettendo informazioni di background al sistema, come feedback ed errori che spesso le interfacce tattili dimenticano di gestire (a differenza delle interfacce GUI che hanno codificato la comunicazione)

### 7.33 Petting robots zoo

**Anno:** 2013

**Team di progettazione:** Minimaforms<sup>94</sup>

**Progetto di ricerca:** non si tratta di un'installazione di lighting design ma di un progetto speculativo ed esplorativo sul modo in cui si comunicherebbe con esseri robotici con comportamenti simili agli umani, con cui si tenta di stabilire comunicazione e connessione emotiva e sensoriale. L'installazione è concepita come un'installazione ambientale e sociale immersiva che permette ai visitatori di interagire con questi animali robotici il cui comportamento si evolve nel tempo. Lo scopo generale è quello di investigare nuove modalità di interazione con l'architettura circostante.

#### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** -
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Colore (tinta, saturazione, luminosità)
  - Animazione/dinamica luminosa
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio) di un elemento luminoso robotico.
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Socializzazione

#### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

- Interazione Spaziale, attraverso il movimento nello spazio (gesture based)

#### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- manuale
- metaforico

#### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Gestualità nell'interazione spaziale: passiva | attiva | performativa



Ogni creatura è equipaggiata da una camera Kinect per osservare le gestualità, i movimenti e le posizioni dei partecipanti che vengono monitorate, mappate e rilevate attraverso la tecnica della blob detection e della lettura del flusso di immagini. Ad esempio la presenza di un soggetto fermo e inattivo determina un comportamento annoiato e distratto da parte delle creature. Questo è il mezzo attraverso cui comunicare alle creature i corrispettivi comportamenti degli utenti per stabilire un rapporto di comunicazione e risposta in tempo reale. Le creature sono inoltre in grado di imparare dalle precedenti esperienze, possedendo una rudimentale versione di machine learning che agisce come memoria, permettendo di sviluppare comportamenti riconoscibili nel contesto di ogni singola situazione. Come output, le creature comunicano

attraverso i propri movimenti, il suono e l'illuminazione. Il sistema è in grado di interagire con diversi partecipanti permettendo la partecipazione collettiva dei soggetti.

**Risultati dell'osservazione**

Intimità e curiosità sono i due più evidenti sentimenti esplorati e abilitanti il apporto di comunicazione e interazione dell'esperienza visiva, auditiva e aptica. Le creature stimolano la partecipazione, l'interesse e richiamano l'attenzione degli utenti stabilendo una relazione di gioco e di intimità.

### 7.34 EyeNut

Anno: 2013

Team di progettazione: HarvardEng<sup>95</sup>

#### Interazione

- **Utenti (chi):** chiunque
- **Contesto applicativo (dove):** uffici, retail, edifici pubblici e commerciali
- **Parametri controllati (che cosa):**
  - Dimming (controllo del flusso)
  - Animazione/dinamica luminosa
  - Distribuzione luminosa (quantità di luci controllate, distribuzione del fascio)
- **Motivazioni di controllo (perché):**
  - Funzionali (visione, benessere, risparmio energetico)
  - Estetiche (atmosfera luminosa)
  - Personalizzazione

#### Tipologie di interfaccia per il controllo e l'interazione con l'illuminazione:

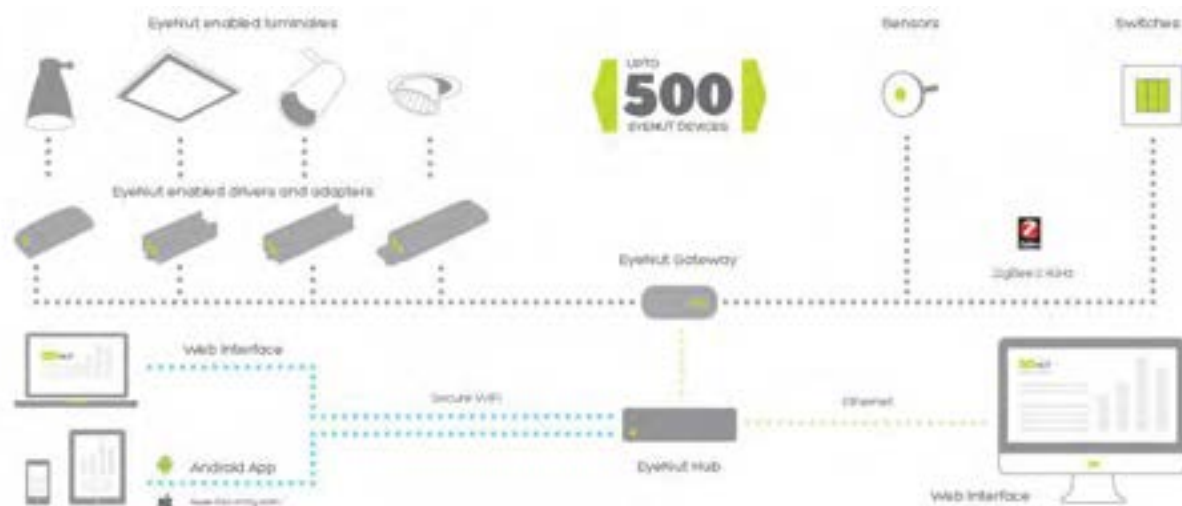
- GUI, interazione utente attraverso un supporto grafico
- SUI, interazione utente attraverso un supporto superficiale

#### Tipologie di coinvolgimento e relazione con l'illuminazione:

- attivo
- ibrido
- astratto

#### Tipologia di interazione: manipolazione e gestualità

- Sull'elemento esterno: manipolazione e gestualità di interfacce SUI



EyeNut è un sistema di controllo e monitoraggio del sistema di illuminazione di interni che permette all'utente non solo di controllare l'illuminazione per ogni punto luce o tramite la creazione di gruppi ma anche di monitorarne i consumi, lo storico del funzionamento e lo status degli apparecchi di illuminazione. Il sistema permette anche la definizione di scene luminose che possono essere configurate anche attraverso uno strumento di Mapping che permette di importare la pianta del luogo in cui si controlleranno le luci.

## 8 Conclusioni

Nel corso della prima parte della ricerca sono stati esaminati gli scenari e le caratteristiche di un sistema di illuminazione industriale per illuminazione generale, sia con sorgenti tradizionali, sia con sorgenti allo stato solido. Particolare attenzione è stata riservata al problema dell'abbagliamento e dei limiti dell'attuale indice nel quantificare tale fenomeno quando l'impianto è realizzato mediante apparecchi SSL.

Successivamente si è proceduto alla descrizione delle diverse tipologie di distribuzione fotometrica in relazione ai diversi contesti applicativi e alla tipologia di sorgente utilizzata, cercando di raggruppare i prodotti presenti sul mercato in differenti tipologie. Per ciascuna di esse, si è cercato di analizzare pregi e difetti, prestando particolare attenzione alle soluzioni con sorgenti allo stato solido.

Inoltre si è esaminato il caso studio rappresentato dall'apparecchio HumbleBee sviluppato da ENEA nel corso di una precedente ricerca: a partire dalle simulazioni impiantistiche dell'attuale versione, sono stati individuati gli aspetti migliorabili del prodotto (in modo particolare il contenimento dell'abbagliamento) e si è proceduto alla progettazione di un sistema ottico che consentisse un miglioramento del comfort del prodotto senza penalizzare eccessivamente le prestazioni (in termini di valori medi di illuminamento e di uniformità sul piano di lavoro) e il risparmio energetico.

Nella soluzione proposta, sono stati anche considerati aspetti di contenimento dei costi di realizzazione e semplicità di realizzazione.

Nella seconda parte della ricerca è stato sviluppato un sistema di illuminazione per luce localizzata con applicazione nel settore industriale: si è partiti da una ricerca sui requisiti del sistema, in termini di performance luminose, funzionalità (es. apertura del fascio variabile, temperatura di colore variabile, dimming), giungendo dapprima alla definizione dei requisiti del sistema e successivamente alla sua progettazione e parziale implementazione attraverso una serie di modelli di studio formali/funzionali.

In particolare, lo studio del sistema di illuminazione localizzata si è focalizzato sugli aspetti fotometrici e gli aspetti di interazione con il sistema di illuminazione sia localizzata che generale. Per quanto riguarda gli aspetti fotometrici, dopo un excursus sullo status dell'arte dei prodotti disponibili sul mercato e sulle attuali tecnologie adatte a determinare le performance luminose obiettivo del progetto, sono stati realizzati una serie di prototipi di studio che sono stati testati e misurati. Le performance ottenute e comparate sono state utilizzate per definire il progetto finale L@W (Light at Work) di cui si è prototipata una versione preliminare in laboratorio per raffinare la forma e le funzioni di controllo della luce, per poi finalizzare il prototipo definitivo mediante tecniche di prototipazione rapida.

Per quanto riguarda l'aspetto di gestione del sistema di illuminazione, sia generale che localizzata, e quindi di interfaccia si è proceduto ad un'analisi dello stato dell'arte dei sistemi utilizzati per il controllo dell'illuminazione in termini di tipologie di controllo (ibrido, manuale o automatico) in termini di interfaccia utilizzata (SUI, TUI GUI, gesture based, audio based etc), in termini di input (quali controlli, mapping etc) in termini di output (performance luminose controllate) al fine di ottenere una panoramica sulle tendenze attuali nella progettazione di interfacce per l'illuminazione e ottenerne delle linee guida per definire il concept dell'interfaccia di gestione di un sistema di controllo industriale. In particolare, a tale scopo è stato ipotizzata un'interfaccia SUI per la gestione del sistema di illuminazione generale (ma anche localizzata) e un'interfaccia di tipo TUI per il sistema di illuminazione localizzata (parzialmente realizzata nel prototipo di studio).

## 9 Curriculum Laboratorio Luce – Politecnico di Milano

Il laboratorio Luce del Politecnico di Milano ([www.luce.polimi.it](http://www.luce.polimi.it)), sotto la direzione scientifica del prof. Maurizio Rossi, opera dal 2002 nei settori della ricerca progettuale industriale, delle misure e

della formazione nel settore illuminazione. Dal 2002 ad oggi ha partecipato e/o diretto oltre 30 progetti di ricerca nel settore illuminazione in collaborazione con le aziende del settore ed enti pubblici di ricerca, la maggior parte di queste attività di ricerca è elencata al link:

<http://www.luce.polimi.it/it/attivita/ricerca>.

Dal 2004 il laboratorio è anche la sede del Master Universitario Annuale in Lighting Design & LED Technology, di una decina di brevi corsi di formazione permanente annuali e di una serie di seminari e convegni dedicati al settore illuminazione che sono illustrati al link:

<http://www.luce.polimi.it/it/attivita/didattica>

## 10 Riferimenti bibliografici

P. Boyce, "Human Factor in Lighting", Taylor and Francis London and New York , Second Edition

P. Boyce, "Human Factor in Lighting", Taylor and Francis London and New York , Third Edition

D. DiLaura, K. Houser, R. Mistrick, G. Steffy, Lighting Handbook 10th Edition, Illuminating Engineering Society of North America

L. Fellin ,G. Forcolini, P. Palladino, "Manuale di Illuminotecnica AIDI", Tecniche Nuove, 1999

Lich.de, "Licht.wissen 05 – Industry and Trade"

UNI 10530 "Principi di ergonomia della visione -Sistemi di lavoro e illuminazione", Febbraio 1997

UNI EN 1837 "Sicurezza del macchinario -Illuminazione integrata alle macchine", Dicembre 2009

UNI EN 12464, "Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni", Luglio 2011

---

<sup>1</sup> Jerome, C. W , "The render of ANSI safety color", Journal of the Illuminating Engineering Society, Volume 6, Issue 3, 1977

<sup>2</sup> Waters, C.E., Mistrick, R.G., and Bernecker, C.A., 1995. Discomfort Glare from Sources of Non-Uniform Luminance. Journal of the Illuminating Engineering Society. 24 (no. 2): 73.

<sup>3</sup> Wienold J, Christoffersen J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. Energy and Buildings 2006; 38(7): 743–757.

<sup>4</sup> T Tashiro, S Kawanobe, T Kimura-Minoda, S Kohko, T Ishikawa and M Ayama 2014 Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangements. Lighting Res. Technol. 2014; 0: 1–22

<sup>5</sup> Wonwoo Kim, Yasuko Koga Effect of local background luminance on discomfort glare Building and environment 39 (2004) 1435-1442

<sup>6</sup> Sweater Hickcox, K., N. Narendran, J.D. Bullough, and J.P. Freyssinier. 2013. Effect of different coloured luminous surrounds on LED discomfort glare perception. Lighting Research and Technology 45(4): 464–475; doi:10.1177/1477153512474450

<sup>7</sup> Hopkinson RG. Architectural Physics: Lighting. London: HMSO, 1963.

<sup>8</sup> H Cai and T Chung Evaluating discomfort glare from non-uniform electric light sources Lighting Research and Technology 2013 45: 267

<sup>9</sup> P Ngai, P Boyce. The effect of overhead glare on visual discomfort Journal of Illuminating Engineering Society, Summer 2000, 29-38

<sup>10</sup> United States Department of Energy, DOE <http://www.energy.gov/>

<sup>11</sup> LED, Report Lighting the clean revolution. The rise of LEDs and what it means for cities JUNE 2012

<sup>12</sup> The next evolution of lighting accesso al sito il 06/09/2013 <http://lucept.com/2013/04/01/the-next-evolution-of-lighting-leds-magazine/>

<sup>13</sup> Strategies in Light, accesso al sito il 06/09/2013 <http://www.strategiesinlight.com/hb-led-track.html>

<sup>14</sup> Lighting Fixture Design Conference 2014 <http://www.lightingfixturedesign.com/>

<sup>15</sup> Verplank B: <http://www.billverplank.com/> (25/06/2014)

<sup>16</sup> Moggridge, B <http://www.designinginteractions.com/bill> (25/06/2014)

<sup>17</sup> Moggridge, B, 2007. Designing Interactions. 1st ed. Spain: The MIT Press.

<sup>18</sup> Maxwell KJ: Human–Computer Interaction Design. In J.D. Bronzino (Ed.), The Biomedical Engineering Handbook, 3d edition, pp. 1337-1350. CRC Press, Boca Raton, FL

<sup>19</sup> ISO 9241-11. 1998. Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) Part 11: Guidance on usability. International Organization for Standardization

<sup>20</sup> Kondraske GV: A working model for human–system–task interfaces. In J.D. Bronzino (Ed.), The Biomedical Engineering Handbook, pp. 2157–2174. CRC Press, Boca Raton, FL. 1995

<sup>21</sup> Maxwell KJ: Human–Computer Interaction Design. In J.D. Bronzino (Ed.), The Biomedical Engineering Handbook, 3d edition, pp. 1337-1350. CRC Press, Boca Raton, FL

<sup>22</sup> Le Peuple, J, Scane, R, 2003. User Interface Design. 1st ed. Bell & Bain Ltd, Glasgow: Crucial, a division of Learning Matters Ltd

<sup>23</sup> Hiroshi Ishii, Brygg Ullmer, Tangible Bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms, Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, CHI'97, Atlanta, Georgia, United States: ACM press, pp. 234-241.

- <sup>24</sup> Hiroshi Ishii [http://modin.yuri.at/tangibles/data/MIT\\_Ishii\\_Musicbottles.pdf](http://modin.yuri.at/tangibles/data/MIT_Ishii_Musicbottles.pdf)
- <sup>25</sup> Wellner, Mackay, Gold 1993; Ishii, Ullmer 1997
- <sup>26</sup> Maniccia, D., Rutledge, B., Rea, M.S., Morrow, W. (1999) "Occupant use of manual lighting controls in private offices", *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Vol 28, pp42-56.
- <sup>27</sup> Newsham, G., Veitch, J. (2001) "Lighting quality recommendations for VDT offices: A new method of derivation", *Lighting Research and Technology*, Vol 33, pp97-116.
- <sup>28</sup> Newsham, G., Veitch, J. (2001) "Lighting quality recommendations for VDT offices: A new method of derivation", *Lighting Research and Technology*, Vol 33, pp97-116.
- <sup>29</sup> Veitch, J.A., Donnelly, C.L., Galasiu, A.D., Newsham, G.R., Sander, D.M., Arsenault C.D. (2010) "IRC Research Report 299 Office Occupants' Evaluations of an Individually-Controllable Lighting System", Ottawa: National Research Council Canada, Institute for Research in Construction.
- <sup>30</sup> Van Essen H., Offerman S., Berry E (2011), Exploring the Role of Autonomous System Behavior in Lighting Control
- <sup>31</sup> Van Essen H., Offerman S., Berry E (2011), Exploring the Role of Autonomous System Behavior in Lighting Control
- <sup>32</sup> Norman Donald A: *La caffettiera del masochista* - Giunti, 1997
- <sup>33</sup> Norman Donald A: *La caffettiera del masochista* - Giunti, 1997
- <sup>34</sup> Vogels I. () Atmosphere metrics, in J.H.D.M.Westerink, M. Ouwkerk, T.J.M. Overbeek, W.F.Pasveer and B. Ruyter, eds. *Probing Experience*. Springer Netherlands, 25-41
- <sup>35</sup> T. Shikabura, H. Morikaewa and Y. Nakamura (2001) Research on the perception of lighting fluctuation in luminous offices environment. *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, 85(5):346-351, 2001
- <sup>36</sup> Gibson J.J. (1986), *The ecological approach to visual perception*, LEA, London, prima ed 1979
- <sup>37</sup> UNI EN 12464 – 1 (2011) *Light and lighting of work places Part 1: Indoor work places*
- <sup>38</sup> IESNA publication RP-7-1991, *Recommended Practice for Industrial Lighting*
- <sup>39</sup> Iesna Handbook 11th Edition
- <sup>40</sup> Norma UNI 10530 *Principi di ergonomia della visione –Sistemi di lavoro e illuminazione-Febbraio 1997*
- <sup>41</sup> Kruithof AA. Tubular luminescence lamps for general illumination. *Philips Tech Rev* 1941;6:65–96.
- <sup>42</sup> Harrington RE. Effects of color temperature on apparent brightness. *J Opt Soc Am* 1954;44:113–116.
- <sup>43</sup> Yamagishi, M.; Yamaba, K.; Nokura, K.; Nagata, M. The Effect of the LED Lighting Characteristics at the Visual Performance. *Proceedings of the 1st International Conference on White LEDs and Solid State Lighting*, Tokyo, November 26–30, 2007.
- <sup>44</sup> P. R. Boyce, Y. Akashi, C. M. Hunter, & J. D. Bullough, "The impact of spectral power distribution on the performance of an achromatic visual task", *Lighting Research and Technology*, vol.35, no.2, pp.141-156, 2003
- <sup>45</sup> Lockley SW, Evans EE, Scheer FA, Brainard GC, Czeisler CA, Aeschbach D. Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. *Sleep* 2006;29:161-168.
- <sup>46</sup> Mills PR, Tomkins SC, Schlangen LJ. The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. *J Circadian Rhythms* 2007;5:2.
- <sup>47</sup> Riemersma-van der Lek RF, Swaab DF, Twisk J, Hol EM, Hoogendijk WJ, Van Someren EJ. Effect of bright light and melatonin on cognitive and noncognitive function in elderly residents of group care facilities: a randomized controlled trial. *JAMA* 2008;299:2642-2655.
- <sup>48</sup> Schulte-Markwort M, Barkmann C, Wessolowski N. Effects of light in schools. In: *Proceedings of CIE 2010 "Light Quality and Energy Efficiency"*; March 14, 2010; Vienna, Austria. OP30.
- <sup>49</sup> Jeff M. Gordon, Peter Kashin, and Ari Rabl, "Nonimaging reflectors for efficient uniform illumination," *Appl. Opt.* 31, 6027-6035 (1992)
- <sup>50</sup> Yi Luo, Zexin Feng, Yanjun Han, and Hongtao Li, "Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source," *Opt. Express* 18, 9055-9063 (2010)
- <sup>51</sup> Ching-Cherng Sun, Yi-Chien Lo, Chih-Chi Tsai, Xuan-Hao Lee, Wei-Ting Chien, Anti-glare LED projection lamp based on an optical design with a confocal double-reflector, *Optics Communications*, Volume 285, Issues 21–22, 1 October 2012, Pages 4207-4210, ISSN 0030-4018
- <sup>52</sup> J. Vos, On the cause of disability glare and its dependence on glare angle, age and ocular pigmentation, *Clinical and Experimental Optometry*, Volume 86, Issue 6, pages 363–370, November 2003
- <sup>53</sup> J. Chaves ; A. Cvetkovic ; R. Mohedano ; O. Dross ; M. Hernandez, et al. "Inhomogeneous source uniformization using a shell mixer Köhler integrator", *Proc. SPIE 8550, Optical Systems Design 2012, 85502X* (December 18, 2012); doi:10.1117/12.981004
- <sup>54</sup> J.Chavesa, A.Cvetkovic, R.Mohedano, O.Dross, M.Hernandez, P.Benitez, J.C. Miñanoc, J.Vilaplana," Inhomogeneous source uniformization using a shell mixer Köhler integrator", *Optical Systems Design 2012*, edited by Pablo Benítez, et al., *Proc. of SPIE Vol. 8550, 85502X*
- <sup>55</sup> J.Chavesa, A.Cvetkovic, R.Mohedano, O.Dross, M.Hernandez, P.Benitez, J.C. Miñanoc, J.Vilaplana," Inhomogeneous source uniformization using a shell mixer Köhler integrator", *Optical Systems Design 2012*, edited by Pablo Benítez, et al., *Proc. of SPIE Vol. 8550, 85502X*
- <sup>56</sup> Interacting with Lighting Innovations <http://kelderman.nu/wp/?p=209>
- <sup>57</sup> <http://www.adielfernandez.com/projects/ambient-data.html>
- <sup>58</sup> <http://technabob.com/blog/2013/03/18/led-wall-sconces/>
- <sup>59</sup> <http://idl.cornell.edu/projects/moodlight/>



- <sup>60</sup> Snyder J. and Matthews M. MoodLight: Exploring Stress Management through Interactive Ambient Light  
<http://pac.cs.cornell.edu/rhythms/files/moodlight-jaime.pdf>
- <sup>61</sup> <https://www.fonckel.com/en/philosophy/>
- <sup>62</sup> Ross P. Wensveen A.G. (2010) Designing Behaviour in Interaction: Using Aesthetic Experience as a Mechanism for Design, retrieved at <http://www.ijdesign.org/ojs/index.php/IJDesign/article/view/765/297>
- <sup>63</sup> <http://www.flynntalbot.com/>
- <sup>64</sup> <http://www.flynntalbot.com/>
- <sup>65</sup> <http://rotwild.carbonmade.com/projects/3231225#1>
- <sup>66</sup> <http://www.pleasurabledoublemakers.com/news/>
- <sup>67</sup> Matthias Laschke | Marc Hassenzahl | Sarah Diefenbach Things with attitude: Transformational Products In proceeding of: Create'11 Conference  
<http://static.squarespace.com/static/52722face4b02a66778dc9d0/t/53318711e4b09837d5a328f8/1395754769468/Laschke,%20Hassenzahl,%20Diefenbach%20-%20Things%20with%20attitude%20Transformational%20Products%20-%202011.pdf>
- <sup>68</sup> <http://dreipuls.com/product/rima/>
- <sup>69</sup> <http://www.andreamuxel.com/teaching/making-things/>
- <sup>70</sup> <http://teaching.ericforman.com/timid-touchless-interactive-lamp/>
- <sup>71</sup> <http://interface.khm.de/index.php/lab/sensoraktor-shield/>
- <sup>72</sup> <https://www.leapmotion.com/company>
- <sup>73</sup> <http://www.frogdesign.com/work/frog-room-e.html>
- <sup>74</sup> <http://www.toshiba.co.jp/lighting/cl/index.htm>
- <sup>75</sup> <http://ambienti.com/#aboutus>
- <sup>76</sup> <http://www.boblab.nl/wordpress/species-of-illumination/>
- <sup>77</sup> <http://vimeo.com/16137364>
- <sup>78</sup> <http://www.nodesign.net/portfolio/waelice>
- <sup>79</sup> <https://www.kickstarter.com/projects/metamanda/clyde-an-expressive-lamp-for-creative-homes?ref=category>
- <sup>80</sup> <http://www.instructables.com/id/Squishy-IR-based-Switch/>
- <sup>81</sup> <http://www.goodnightlamp.com>
- <sup>82</sup> [http://www.design.philips.com/sites/philipsdesign/about/design/designportfolio/design\\_for\\_lighting/LivingColors.page](http://www.design.philips.com/sites/philipsdesign/about/design/designportfolio/design_for_lighting/LivingColors.page)
- <sup>83</sup> [http://www.design.philips.com/shared/assets/design\\_assets/pdf/portfolio/LivingColors\\_Backgrounder\\_sept2012.pdf](http://www.design.philips.com/shared/assets/design_assets/pdf/portfolio/LivingColors_Backgrounder_sept2012.pdf)
- <sup>84</sup> <http://throne-bms.eu/en/>
- <sup>85</sup> <http://throne-bms.com/pro/en/pages/models>
- <sup>86</sup> <http://via-app.com/>
- <sup>87</sup> <http://www.lirio-light.com/Catalogus/detail.aspx?fam=LUCEBAR>
- <sup>88</sup> [http://www.progetto25zero1.com/\\_domini/pupalamp.com/](http://www.progetto25zero1.com/_domini/pupalamp.com/)
- <sup>89</sup> <http://www.progetto25zero1.com/sito2501/ita/identita.html>
- <sup>90</sup> Koen van Boerdonk, Jon Mason, Dzmityr Aliakseyeu (2011) User Interface for Task Lighting in Open Office in Proceedings of the workshop on User Interaction Techniques for Future Lighting Systems September 5, 2011: Lisbon, Portugal in conjunction with Interact
- <sup>91</sup> [www.hellonod.com](http://www.hellonod.com)
- <sup>92</sup> J. Westerhoff, R. van de Sluis, J. Mason & D. Aliakseyeu (2012) M-Beam: A Tangible Atmosphere Creation Interface  
<http://2012.experiencinglight.nl/doc/38.pdf>
- <sup>93</sup> [http://conceptlab.tue.nl/?page\\_id=866](http://conceptlab.tue.nl/?page_id=866)
- <sup>94</sup> <http://minimaforms.com/petting-zoo-3/>
- <sup>95</sup> <http://www.eyenut.co.uk/>