



Ricerca di Sistema elettrico

## Fosfori remoti per l'illuminazione di interni

*Maurizio Rossi, Daria Casciani, Fulvio Musante*



POLITECNICO DI MILANO  
DIPARTIMENTO DI DESIGN

## FOSFORI REMOTI PER L'ILLUMINAZIONE DI INTERNI

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

10 Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

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

Progetto: C1 "Risparmio di energia nei settori: industria, servizi e civile"

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 "Advanced LED Lighting Design"

Responsabile scientifico ENEA: Simonetta Fumagalli



Responsabile scientifico per il Politecnico di Milano: Maurizio Rossi



## Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 OVERVIEW   LO SPAZIO UFFICIO: UNA BREVE INTRODUZIONE .....	6
2.1 UFFICIO STEREOTIPATO.....	6
2.2 UFFICIO ANTROPIZZATO.....	8
2.3 PROGETTO   UN APPROCCIO INTEGRATO ALLA PROGETTAZIONE DELLA QUALITÀ DELLA LUCE NELL'UFFICIO .....	9
2.4 PROGETTO   UNO SGUARDO ALLE TENDENZE DELL'ILLUMINAZIONE DELL'UFFICIO CONTEMPORANEO.....	11
2.4.1 <i>Smaterializzazione e minime dimensioni</i> .....	11
2.4.2 <i>Luce dinamica: il cielo nella stanza</i> .....	11
2.4.3 <i>Flessibilità e integrazione</i> .....	12
2.4.4 <i>Personalizzazione</i> .....	12
3 ILLUMINAZIONE PER MIGLIORARE LE PERFORMANCE E IL BENESSERE.....	13
3.1 RADIAZIONE MONOCROMATICA VS RADIAZIONE POLICROMATICA .....	14
3.2 DIPENDENZA DELL'EFFETTO DI SOPPRESSIONE DALLA POSIZIONE DELL'ILLUMINAZIONE SULLA RETINA .....	16
3.3 DIPENDENZA TEMPORALE .....	17
3.4 RISCHI PER LA SALUTE.....	18
3.5 VARIAZIONE DINAMICA DELL'ILLUMINAZIONE .....	18
4 CONCLUSIONI PRELIMINARI SUI SISTEMI DI ILLUMINAZIONE CIRCADIANA NEGLI UFFICI .....	20
5 EFFICIENZA ENERGETICA-QUALITÀ DELLA LUCE-BENESSERE .....	21
6 PERSONALIZZAZIONE .....	23
7 POSSIBILI SOLUZIONI TECNOLOGICHE PER IL SISTEMA OTTICO .....	24
7.1 SISTEMI OTTICI A RIFLESSIONE .....	24
7.2 GUIDALUCE.....	26
7.3 BACK LIGHT.....	26
7.4 PELLICOLE RIFLETTENTI.....	33
8 LA GENERAZIONE DELLA LUCE BIANCA CON I LED.....	35
8.1 LUCE BIANCA PER CONVERSIONE DI FOSFORI .....	37
8.2 FOSFORI REMOTI.....	39
9 BENCHMARKING DEI PRODOTTI A FOSFORI REMOTI DISPONIBILI SUL MERCATO .....	42
9.1 PHILIPS FORTIMO LED DLM GEN 3+ SYSTEM .....	42
9.2 PHILIPS FORTIMO LED DLM FOOD .....	44
9.3 PHILIPS FORTIMO LED LINEAR LIGHT MODULE (LLM).....	45
9.4 XICATO.....	45
10 OSSERVAZIONI SUI PRODOTTI SELEZIONATI .....	48
11 CHIP ON BOARD (COB).....	49
12 MODULI LED - LED LIGHT ENGINE.....	49
12.1 CREE .....	50
12.2 PHILIPS.....	52
12.2.1 <i>Fortimo LED SLM system</i> .....	53
12.2.2 <i>Fortimo LED High Brightness Module (HBMt)</i> .....	53
12.3 GE.....	54
13 SISTEMI IBRIDI: CONSIDERAZIONI PER LA PROGETTAZIONE DI UN MOTORE LUMINOSO.....	55

14	COB TUNNABLE WHITE: CONSIDERAZIONI PRELIMINARI PER LA PROGETTAZIONE DI UN MOTORE LUMINOSO...	64
15	ULTERIORI MISURAZIONI EFFETTUATE .....	67
15.1	MISURAZIONI FOTOMETRICHE.....	68
16	DIPENDENZA DEL FLUSSO LUMINOSO DALLA CORRENTE DI PILOTAGGIO .....	72
17	MISURE SPETTRALI EFFETTUATE.....	77
18	MISURA DELLA RESA CROMATICA .....	81
19	CONFRONTI FRA TECNOLOGIE: MISURE .....	88
20	CONCLUSIONI E CONSIDERAZIONI SULLE DIVERSE SOLUZIONI TECNOLOGICHE.....	96
21	CONCEPT INIZIALI PER IL PROGETTO OTTICO PROPOSTO.....	97
22	PROGETTO DELLA SORGENTE A FOSFORI REMOTI .....	105
22.1	DIPENDENZA DALLA TEMPERATURA.....	109
22.2	VARIAZIONI DI COLORE .....	111
22.3	DIMENSIONI DELLA CAMERA DI MISCELAZIONE E DISPOSIZIONE DEI LED .....	112
22.4	UNIFORMITÀ CROMATICA .....	116
23	PROGETTO DEL SISTEMA A BIANCO DINAMICO MEDIANTE LED BIANCHI A CONVERSIONE DI FOSFORO .....	123
24	PROGETTO   MODULO E SISTEMA MODULARE: COEEOLO .....	125
24.1	INTRODUZIONE .....	125
24.2	OVERVIEW   MODULO E SISTEMA MODULARE .....	125
24.3	PROGETTO   DIMENSIONAMENTO GEOMETRICO DEL MODULO.....	127
24.4	PROGETTO   TECNOLOGIA A FOSFORI REMOTI: SPECIFICHE.....	128
24.5	PROGETTO   SOLUZIONE TECNOLOGICA ALTERNATIVA .....	129
24.6	PROGETTO   DIMENSIONI DEL MODULO SINGOLO COEEOLO .....	130
24.7	CARATTERISTICHE DEL MODULO COEEOLO SINGOLO .....	130
24.8	PROGETTO   COMPONENTI DEL COEEOLO SINGOLO .....	132
24.9	PROGETTO   DISSIPAZIONE TERMICA.....	134
24.10	PROGETTO   CARATTERISTICHE FOTOMETRICHE E SIMULAZIONI DI ILLUMINAZIONE.....	138
25	SISTEMA   COEEOLO <sup>N</sup> .....	141
25.1	PROGETTO   CONFIGURAZIONE.....	141
26	PROTOTIPO COEEOLO   LISTA DEGLI ALLEGATI .....	144
27	CONCLUSIONI.....	145
28	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	146
29	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	149
30	APPENDICE – CURRICULUM GRUPPO DI LAVORO .....	149

QUESTO DOCUMENTO INCLUDE ALLEGATI

## Sommario

Il presente lavoro di ricerca descrive il progetto di un sistema modulare, per l'illuminazione di uffici, il cui acronimo è "COEEO", che significa appunto "**COmfortable, Efficient Experiential Lighting for Office**".

Nella parte iniziale della ricerca, sono state analizzate le nuove tendenze nella progettazione degli spazi dell'ufficio che si configura come un luogo dicotomico, in cui si è vissuta un'epocale standardizzazione: si è cercato di ottenere le migliori prestazioni lavorative riducendo lo spazio e le funzioni vitali dell'uomo, limitandole a meccaniche ripetitive operazioni in spazi angusti e poco umani. Al contrario recenti orientamenti progettuali rappresentano l'ufficio come un nuovo luogo dell'abitare contemporaneo che necessita di una rottura con le precedenti regole razionali per un contesto più umano e umanizzabile.

Questo approccio è fondamentale al fine di ripensare l'apparecchio di illuminazione come elemento che definisce l'apparenza dello spazio non solo estetica ma anche percettiva, in grado di determinare l'atmosfera dell'ufficio stesso.

Sono stati poi analizzati nel dettaglio gli effetti non visivi della luce, con particolare interesse per gli aspetti di natura circadiana e di benessere dell'individuo all'interno degli ambienti di lavoro. Sono state quindi individuate alcune delle caratteristiche dell'impianto di illuminazione per ufficio, con particolare riferimento al concetto di bianco dinamico e personalizzazione delle performance luminose.

Si è poi passati ad analizzare i sistemi di generazione di luce bianca con tecnologia allo stato solido, mettendo in evidenza pregi e difetti di ciascuno in relazione ad aspetti di efficienza e di qualità cromatica della luce emessa. L'analisi è stata condotta sulla base di un benchmark di prodotti semilavorati costruiti con diverse tecnologie (fosfori remoti, power LED, COB, tecnologia ibrida) basandosi sia sui dati presenti sui datasheet dei produttori sia su misure di laboratorio su alcuni esemplari.

Sulla base dei dati raccolti e sulla base di una ricerca bibliografica sulle diverse tecnologie e sistemi ottici disponibili sul mercato o descritti in letteratura, è stato progettato un sistema di illuminazione modulare, in cui il motore luminoso può ospitare due differenti tecnologie tra quelle esaminate, in modo che possa essere un valido sistema di valutazione delle diverse possibilità tecniche offerte dal mercato a parità di condizioni al contorno. Si è infatti constatato che il confronto tra le diverse tecnologie a partire da elementi semilavorati profondamente diversi tra loro risulta molto difficoltoso.

Il sistema progettato risulta **MODULARE** e **RICONFIGURABILE** e prevede l'utilizzo di un numero di elementi diversi ripetuti e assemblati in maniera tale da costituire la configurazione desiderata. In particolare, sia il riflettore, sia gli elementi di cover superiore sono stati studiati al fine di poter essere opportunamente montati per soddisfare diverse soluzioni di design.

## 1 Introduzione

La ricerca parte dallo studio dello stato dell'arte dei sistemi a fosfori remoti e altri sistemi di generazione di luce bianca mediante tecnologia allo stato solido per individuarne pregi, difetti, indicazioni applicative e valutarne le performance in termini di resa cromatica, efficienza, confort visivo e aspetti fisiologici circadiani dell'illuminazione artificiale negli interni. Si delimita il campo applicativo della ricerca all'illuminazione di interni, con particolare attenzione all'illuminazione come scuole e uffici.

Sulla base dei risultati ottenuti, si è proceduto alla progettazione di un sistema di illuminazione generale, con particolare attenzione alla parte ottica e alla definizione della prestazione luminosa, per uffici, che utilizzi la tecnologia LED. Il sistema dovrà avere caratteristiche di flessibilità della performance luminosa che lo renda adatto al particolare ambito applicativo. Altri aspetti del prodotto come l'alimentazione, i sistemi di controllo intelligente, i sistemi di fissaggio e la definizione dei dettagli sul grado di protezione IP, saranno definiti a livello di concept.

## 2 Overview | Lo spazio ufficio: una breve introduzione

Come si presenta lo spazio ufficio contemporaneo? Quali requisiti, necessità e desideri latenti esprimono e non i lavoratori dei moderni uffici? Quali tendenze posso essere individuate nei layout progettuali degli uffici di nuova generazione? Come è la quotidianità lavorativa negli uffici pubblici e/o privati?

A queste domande si cercherà brevemente di rispondere portando esempi e citazioni autorevoli di progettisti e sociologi che parlano dello spazio ufficio come un luogo dicotomico, in cui si è vissuta un'epocale standardizzazione e si è cercato di ottenere le migliori prestazioni lavorative riducendo lo spazio e le funzioni vitali dell'uomo a meccaniche, ripetitive, operazioni in spazi angusti e poco umani e allo stesso tempo si cerca di rappresentare un nuovo luogo dell'abitare contemporaneo che necessita di una rottura con le precedenti regole razionali per un contesto più umano e umanizzabile. Questa breve introduzione è finalizzata sia alla comprensione di come si sia evoluto lo spazio per il lavoro e di come si stia cercando di trasformarlo per un miglioramento non solo delle prestazioni lavorative stesse ma anche delle condizioni umane in generale. Questo excursus sarà utile anche per ripensare all'apparecchio di illuminazione come elemento fondamentale nella definizione dell'apparenza dello spazio non solo estetica ma anche percettiva, in grado di determinare l'atmosfera dell'ufficio stesso.

### 2.1 Ufficio stereotipato

*“Sono sempre stato colpito dalla ripetizione e dall'anonimato del mondo dell'ufficio: interi palazzi di uffici costruiti in serie, dovunque nel mondo. Le facciate vetrate e ripetitive accolgono gli stessi spazi, gli stessi mobili, gli stessi computer, le stesse luci livide appese a soffitti tecnici. Un dispositivo architettonico totalitario e vuoto di senso, risultante da una produzione industriale e tecnica scollegata dalla storia urbana, associato alla globalizzazione sfrenata, porta all'annichilimento massiccio di tutte le culture e di tutte le differenze. Rinchiude tutti i lavoratori del mondo in un sistema seriale e standardizzato.” Jean Nouvel<sup>1</sup>*

Gli uffici moderni sono stati pensati, progettati e realizzati come spazi dello standard, in cui nulla è lasciato al caso ma ogni dettaglio è realizzato per il funzionamento efficace dello stesso: tutto al loro interno è calcolato con precisione: dal numero di decibel, dei lux, dalla lunghezza dei percorsi, dalla frequenza dei luoghi di sosta, dallo spazio utile per determinate attività di concentrazione e lavoro, al tipo e alla quantità di informazioni. Come descritto da Mark Auge<sup>2</sup>, nell'ufficio si concretizza il sogno della "macchina per abitare" (Figura 1), ovvero l'idea di uno spazio ergonomico efficiente e con un altissimo livello di comodità tecnologica (ICT, illuminazione, etc).

Le modalità d'uso di questi spazi sono pensate a livello progettuale per essere destinate all'utente medio, all'uomo generico, al percentile della popolazione senza distinzioni o personalizzazioni. Non si è di fronte ad

un progetto di spazio vivibile per le persone ma ad entità anonime, luoghi senza conoscenza umana e approfondimento individuale, luoghi inerti senza cultura e referenze storiche, identitarie e vissute. Lo spazio ufficio risulta disindividualizzato, banalizzato e impoverito senza elementi di interesse o curiosità, oggetti ed esperienze interessanti, spazi non antropici nonostante siano progettati per gli esseri umani. La controtendenza rispetto a questa impostazione iper-razionalista e logica dell'ufficio ad alte prestazioni ed efficienza è uno spazio alternativo, progettato a dimensione umana, in cui non sia esaltato soltanto lo sfruttamento delle risorse (in generale, economiche, energetiche e umane) al minimo dello sforzo e al massimo del rendimento ma ci si concentri anche sull'esperienza.

*“Presto si ammetterà che le condizioni di lavoro caricaturali proposte da questi uffici sono invivibili, analoghe a quelle che Charlie Chaplin denunciava in Tempi Moderni. In altre parole, mi oppongo a tutti i fenomeni di clonazione e di imposizione. È urgente cambiare i comportamenti, progettare e pensare il lavoro in modo alternativo: un ufficio, dovunque si trovi, deve essere uno spazio a se stante, ossia identificabile, appropriabile, trasformabile, carico di umanità, pieno di strati di storia e di oggetti, un luogo semplicemente piacevole. Lavorare significa vivere, abitare.” Jean Nouvel*



**Figura 1** L'ufficio moderno come "macchina per abitare", ovvero l'idea di uno spazio ergonomico efficiente e con un altissimo livello di comodità tecnologica (ICT, illuminazione, etc).

La condizione del lavoratore, da questo punto di vista progettuale, emerge in tutta la sua importanza: l'ufficio deve de-standardizzarsi e assumere un volto più umano, trasformarsi ed essere capace di assecondare le esigenze, latenti o inesprese, di coloro che lo vivono, spesso per più di 10 ore al giorno. Per questo motivo dall'idea di macchina da abitare di Le Corbusiana memoria si passa alla "nozione del piacere

di vivere [...] da infondere nell'ufficio da abitare: lavorare è anche vivere e spesso si passa più tempo in ufficio che non a casa propria." **Jean Nouvel**

Gli uffici sono ripensati come spazi senza regole tradizionali, dove in primo piano viene messo il piacere di lavorare, dove ognuno compone il proprio ambiente secondo le proprie esigenze, dove vivono giochi di luci e riflessi.

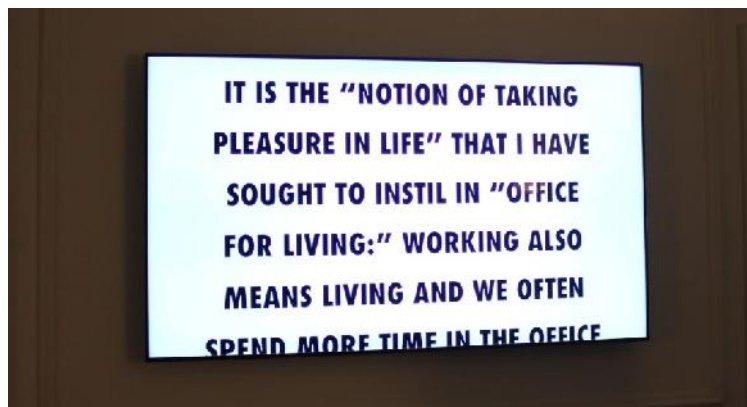


Figura 2 Manifesto dell'illuminazione per l'ufficio come un luogo in cui vivere

## 2.2 Ufficio antropizzato

Se la tendenza generale è dunque quella di restituire lo spazio del lavoro a chi tale lavoro svolge, il contesto spaziale, gli oggetti che ne fanno parte e le condizioni ambientali di tale spazio devono essere:

- personali e personalizzabili;
- flessibili e trasformabili;
- semplici da utilizzare (anche se tecnologicamente avanzati)

L'ufficio diventa uno spazio vitale, vissuto e vivo in cui quel che conta è l'esperienza personale, l'impressione che viene creata, l'atmosfera in cui si vive, la capacità di questo spazio di incarnare le vocazioni lavorative, passionali e personali.

*"Oggi i tavoli, le scrivanie, i computer e la carta sono falsi problemi. Non è cambiare la forma dei tavoli o il colore dei computer che ci farà più contenti. Possiamo essere paradossalmente più contenti in un polveroso vecchio ufficio che non in quello più ultramoderno colorato cosmico super interattivo e tecnologico: piuttosto è importante l'atmosfera. [...]Un ufficio è come un organismo vivente che deve essere cambiato in continuazione, trasformando lo spazio anche banalmente in ragione delle stagioni, del tempo, delle tendenze, delle aspirazioni, delle passioni."* **Michele De Lucchi**<sup>3</sup>

Da questo punto di vista, l'importanza affidata alle condizioni ambientali, all'atmosfera dello spazio ufficio sembra essenziale da un punto di vista della percezione e dell'esperienza lavorativa in ufficio. Per questo motivo, l'illuminazione gioca un ruolo primario nella definizione dell'ufficio, perché, in maniera completamente immateriale, è in grado di modificare lo spazio e la percezione che si ha dello stesso: l'illuminazione modifica la percezione delle dimensioni e dei volumi, i rapporti di prossimità e vicinanza tra persone e oggetti. La quantità, l'intensità e la distribuzione dell'illuminazione contribuisce a definire uno spazio anonimo o personale, distaccato o ospitale, vissuto come pubblico o come spazio privato. A questo si aggiunge la tonalità della luce bianca, più calda o più fredda e la capacità di rendere bene i colori (resa cromatica) che determinano la percezione di uno spazio vissuto piacevole nell'apparire ma anche vissuto come più o meno confortevole rispetto alle diverse attività che si sviluppano. A questo proposito, la capacità di modificarsi e trasformarsi in linea con le diverse attività e funzioni che si svolgono all'interno dell'ufficio, durante le diverse ore del giorno e nelle diverse stagioni.



## 2.3 Progetto | Un approccio integrato alla progettazione della qualità della luce nell'ufficio

Il progetto della luce per uffici è ormai consolidato e codificato da norme e raccomandazioni (UNI EN 12464-1 edizione 2011)<sup>4</sup> che garantiscono la corretta visione durante lo svolgimento delle attività lavorative. Le performance visive sono assicurate da diversi parametri di seguito brevemente riassunti:

- adeguati livelli di illuminamento;
- distribuzione armonica delle luminanze e buone uniformità sui piani di lavoro;
- limitazione dell'abbagliamento diretto e riflesso;
- appropriata resa e apparenza cromatica della luce.

Un più recente approccio alla progettazione della luce indica la necessità di focalizzarsi “[...]sulle condizioni della modernità a partire dai processi sociali, dalle relazioni prossemico-comportamentali contemporanee, dalla psicologia ambientale, fino all'esplorazione delle nuove frontiere tecnologiche e linguistiche.” (Carlotta de Bevilacqua in Rossi. M. 2008)<sup>5</sup>

Se infatti, le conoscenze sugli effetti della luce sulla visione sono ormai noti, meno esplorati sono i legami tra l'illuminazione e le sensazioni di benessere, la salute e la piacevolezza dello spazio per gli occupanti. La ricerca sull'illuminazione oggi si concentra sul rapporto tra l'uomo e l'illuminazione, e cerca di rispondere, in maniera operativa, ad alcuni quesiti. Quali effetti luminosi influenzano lo stato d'animo e il comportamento degli individui? Quali messaggi visivi dell'illuminazione interagiscono con il sistema percettivo? Quali effetti ha la luce rispetto alla salute e alle performance lavorative degli individui? (Boyce, 2004)<sup>6</sup> Quali nuove forme di illuminazione possiamo immaginare in risposta?

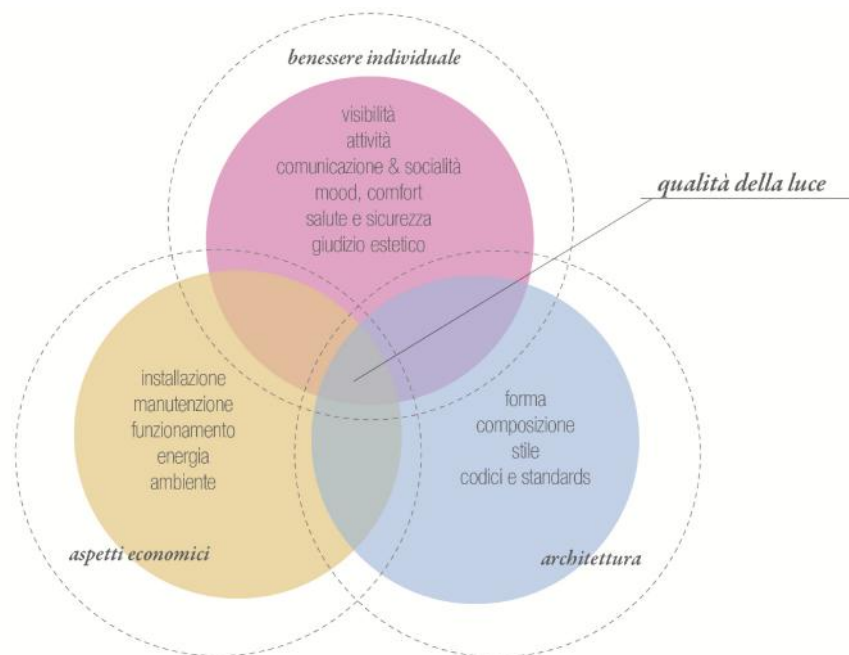
A questo si aggiunga la necessità di una progettazione di apparecchi e sorgenti di illuminazione più efficienti, che stimolino comportamenti più responsabili nell'uso dell'elettricità, sia per motivi di risparmio energetico e di tagli dei costi sia di tematiche ambientali legate alla riduzione del CO<sub>2</sub>.

Progettare un'illuminazione di qualità negli ambienti di lavoro è dunque oggi una sfida che implica garantire benessere, personalizzazione, capacità di trasformazione ed esperienza di luce. Tutto questo plausibilmente in conformità con prestazioni ad alta efficienza. Per qualità della luce non si intende un elemento fisico misurabile e proprio dello spazio o del progetto della luce, ma l'integrazione di tutti i fattori che contribuiscono a realizzare un ambiente di lavoro positivo per le persone che lo utilizzano. (Figura 3)

Ricerche riguardanti la qualità della luce svolte nel corso dei passati decenni, hanno dimostrato che la luce presenta effetti sui comportamenti che non sono determinati dalla visione: essa contribuisce positivamente all'interazione sociale ed è in grado di influenzare la salute e l'umore (felicità, allerta, soddisfazione), migliora la performance lavorativa nella velocità e accuratezza con cui gli oggetti sono percepiti e riconosciuti.

Tali studi hanno permesso di identificare una serie di parametri qualitativi per la progettazione dei nuovi sistemi di illuminazione che, oltre a garantire una corretta visione, devono:

- supportare le performance richieste a seconda dell'attività svolta;
- favorire la comunicazione e l'interazione tra le persone;
- contribuire a creare un mood appropriato alla situazione e al contesto d'uso;
- evitare effetti che possano causare malessere o disagio;
- contribuire a far sentire le persone a proprio agio attraverso la gestione autonoma della luce e l'autodeterminazione del proprio spazio di lavoro;
- contribuire all'apprezzamento estetico dello spazio.



**Figura 3 Schema delle relazioni tra elementi che contribuiscono a determinare la qualità della luce. (Rielaborazione grafica da Veitch, 1998)<sup>7</sup>**

Questi concetti introducono un nuovo punto di vista del progetto della luce che guarda all'uomo e allo spazio in cui egli vive, focalizzandosi sulle qualità della luce per definire nuove relazioni e artefatti di luce. Nello spazio ufficio, la vera sfida progettuale è tesa ad ottenere un corretto bilanciamento tra alcuni aspetti chiave come:

- **BENESSERE E COMFORT**  
limitazione dell'abbagliamento, resa cromatica, bianco uniforme;
- **RESPONSABILITA' E SOSTENIBILITA'**  
rendimento dell'apparecchio (LOR), efficienza energetica, LCA Design for Disassembling
- **ADATTABILITA' ED ESPERIENZA**  
bianco dinamico, illuminazione regolabile, illuminazione personalizzabile, apparecchio modulare in un contesto di cambiamento tecnologico determinato dalla tecnologia LED.

## 2.4 Progetto | Uno sguardo alle tendenze dell'illuminazione dell'ufficio contemporaneo

Individuando le attuali tendenze nel design dell'illuminazione negli spazi di lavoro, si vuole brevemente porre l'attenzione sulle strategie progettuali, i requisiti e le nuove caratteristiche implementate negli apparecchi di illuminazione di recente produzione. I prodotti di seguito illustrati sono stati scelti come icona di trend differenti, come stimolo per il design di un sistema di illuminazione veramente innovativo con la tecnologia LED e le capacità di questa di essere controllata. Dall'analisi di questi esempi risulta non avere molto senso progettare un apparecchio classico da ufficio equipaggiato da sorgenti tradizionali (ad esempio fluorescenti lineari) e realizzarne una versione con tecnologia SSL che si tradurrebbe in una soluzione leggermente più avanzata di un retrofit. La tecnologia LED con le sue specifiche peculiarità (minimi ingombri, luce puntiforme, dimmerabilità), i sistemi ottici a riflessione studiati per essa e le capacità (possibilità) di gestione della luce, portano a pensare a prodotti diversi, con caratteristiche particolari e funzionalità aumentate.

### 2.4.1 Smaterializzazione e minime dimensioni

Gli apparecchi di illuminazione si assottigliano raggiungendo minimi spessori, diventano trasparenti quando non in uso, utilizzano la tecnologia LED iniettando la luce all'interno di strati di plastiche microprismate da cui derivano un'estetica minimalista fatta di pura luce che non infastidisce l'osservatore con sgradevoli abbagliamenti e riflessi (Figura 4). Leggeri, geometrici o sinuosi, scompaiono nell'ambiente ufficio generando superfici planari luminose e luminescenti.



**Figura 4 Smaterializzazione e minime dimensioni, alcuni esempi: Helios di Xal, DayWave di Philips, Superflat di Flos**

### 2.4.2 Luce dinamica: il cielo nella stanza

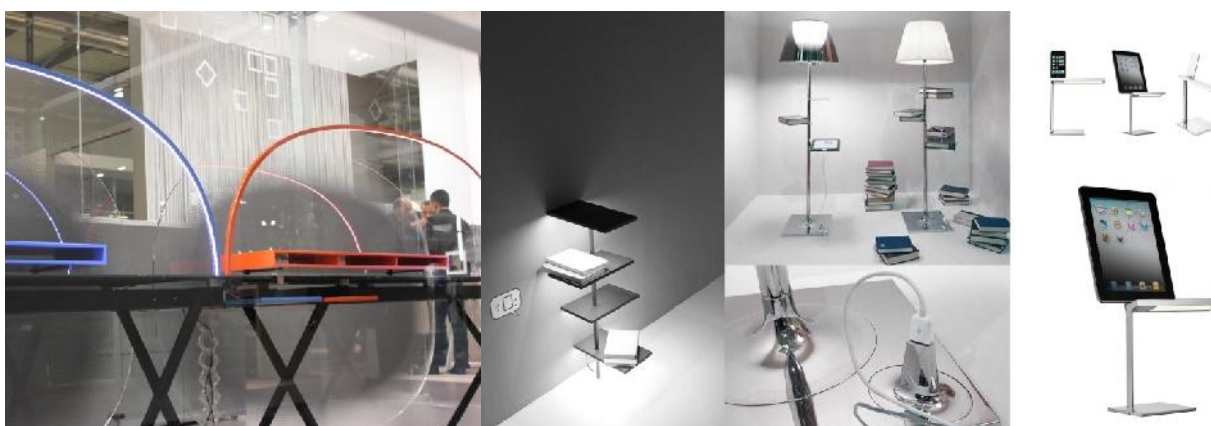
Il colore della luce e la capacità di variare nel corso di una giornata sono fattori molto importanti per il benessere psicofisico degli individui dato che possono contribuire a migliorare il rendimento lavorativo, agire sull'umore e ristabilire il corretto funzionamento dell'orologio biologico umano. Molti prodotti di illuminazione propongono una luce che simula la luce naturale attraverso la variazione dinamica della temperatura di colore (in modo automatico nel corso della giornata) e l'adattabilità a condizioni di luce esistenti. In altri casi più iconici, l'immagine del cielo in tutte le sue variazioni atmosferiche (soleggiato, uggioso, limpido, chiaro, azzurro, cristallino, tempestoso, ceruleo, nuvoloso, sereno, coperto, terso, pulito) è stata tradotta in una versione tecnologica, personale ed artificiale (Figura 5).



**Figura 5 Esempi di cieli artificiali: Personal Skyes di IDEO e Naoto Fukasawa, Virtual Sky di Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO, Hypersky di Kram/Weisshaar, Skylight lamp di 5.5 Designers. Illuminazione Dinamica, esempi: Trifluo My White Light Artemide, Dynamic Lighting Philips**

### 2.4.3 Flessibilità e integrazione

Uffici open-space hanno la necessità di un continuo riposizionamento delle postazioni di lavoro in base a diverse esigenze e attività (lavoro flessibile in termini di tempo, funzioni svolte e utenti che ne fanno uso). Nuovi apparecchi di illuminazione contribuiscono a supportare questa flessibilità, potendo essere modificati e spostati. Tale flessibilità comprende anche la gestione dell'alimentazione attraverso l'integrazione di tutte le funzioni di alimentazione normalmente necessarie in un ufficio (Figura 6).



**Figura 6 Integrazione tecnologica funzionale: luce e stazione di ricarica, esempi Hook di Newform, Vibia, Flos**

### 2.4.4 Personalizzazione

Numerosi studi sulla luce negli uffici hanno verificato che, se si lascia libertà di interagire con la luce, i livelli di illuminazione impostati dai soggetti sono molto inferiori rispetto a quanto previsto dalle norme. Oltre a questo, la possibilità di poter personalizzare e controllare l'illuminazione in maniera autonoma, garantisce un maggior livello di benessere psicologico, un maggiore grado di comfort ed appagamento da parte degli utenti (Boyce e Veitch, 2003)<sup>8</sup>. Ne consegue risparmio energetico e responsabilizzazione nell'utilizzo dell'energia.

Di particolare interesse i nuovi prodotti di illuminazione per la luce personale (task light), ovvero modificabile in base ad esigenze sia di tipo fisiologico (ovvero età di una persona che ha bisogno di più elevati valori di illuminamento per problemi di vista di vario tipo), sia rispetto alle diverse attività svolte (ovvero attività di concentrazione che richiedono valori di illuminamento più elevati rispetto ad altre attività di creatività e relax). Da standard o passivi, gli utenti diventano attivi fruitori di atmosfere luminose

che possono selezionare e modificare: sensori, applicazioni software, sistemi di controllo, gestualità e rituali interattivi stanno dipingendo un nuovo scenario di contatto diretto con una performance luminosa adattabile e individualizzata. (Figura 7)



**Figura 7** Modalità di interazione con il prodotto di illuminazione per una maggiore personalizzazione della prestazione luminosa

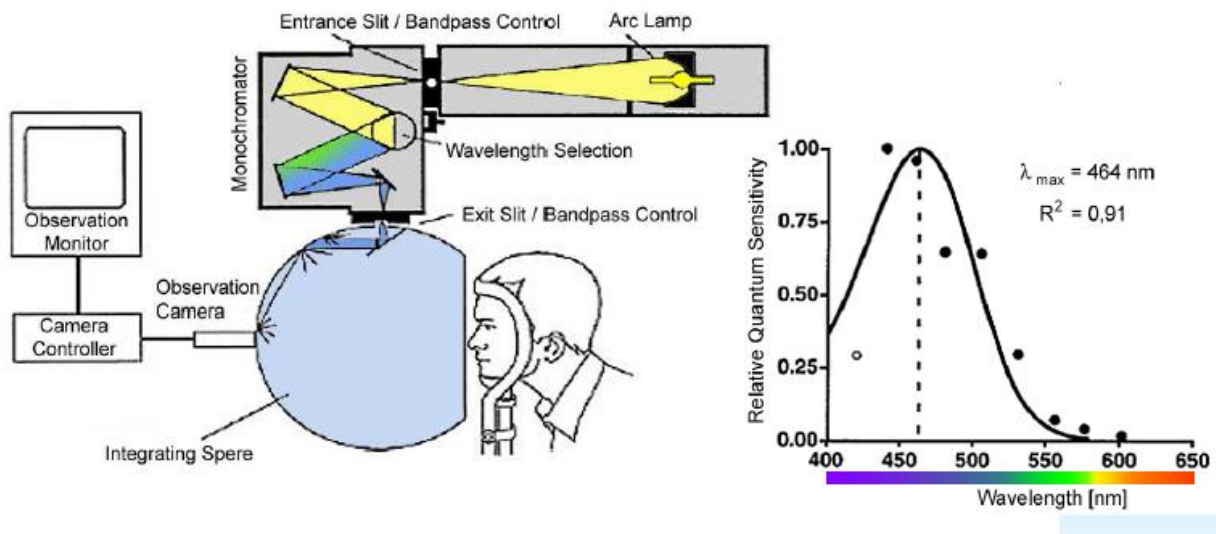
### 3 Illuminazione per migliorare le performance e il benessere

Negli ultimi dieci anni una serie di nuove scoperte tecnologiche e bio-fisiologiche hanno rivoluzionato il mondo dell'illuminazione:

- Comparsa e diffusione sul mercato delle sorgenti LED
- Scoperta di un nuovo fotorecettore (photorecettive ganglion cell ipRGC) identificato come il legame tra la luce e molte funzioni del sistema endocrino e circadiano<sup>9,10,11</sup>

All'inizio del 2000, due differenti gruppi di ricercatori, Brainard<sup>12,13</sup> et al. e Thapan<sup>14</sup> et al. hanno studiato il legame tra la soppressione della melatonina e l'esposizione alla luce, trovando la massima efficienza di soppressione di notte per stimolazioni con lunghezze d'onda pari a 460 nm.

L'apparato utilizzato dal team di Brainard è rappresentato alla Figura 8: i volontari arrivano in laboratorio a mezzanotte, con pupille dilatate, bendati e fatti sedere in una stanza buia fino alle 2.00 del mattino (fino alle 3:00 del mattino, nel caso si tratti di un gruppo di controllo). I soggetti sono esposti per 90 minuti a una radiazione monocromatica con una larghezza del picco di 10-14 nm (una camera controlla che gli occhi dei pazienti rimangano aperti per tutta la durata dell'esperimento). Campioni di sangue sono prelevati alle 2:00 e alle 3:30 del mattino per la valutazione del livello della melatonina nel sangue. All'esperimento hanno partecipato 72 uomini e donne in buona salute generale, con una durata complessiva di 700 notti. Le lunghezze d'onda testate sono state nove: 420-440-460-480-505-530-555-575-600 nm.



**Figura 8** Esperimento per la determinazione della sensibilità spettrale notturna nella soppressione della melatonina (Brainard et al. / The Journal of Neuroscience, 2001)

Sulla base degli studi citati, sono state fatte numerose ricerche che hanno concluso che una sorgente luminosa con spettro ricco di corte lunghezze d'onda in combinazione con livelli elevati di illuminamento sulla cornea e una distribuzione luminosa dinamica, aumentano l'attenzione e la vigilanza<sup>15,16,17,18,19</sup>.

### 3.1 Radiazione monocromatica vs radiazione policromatica

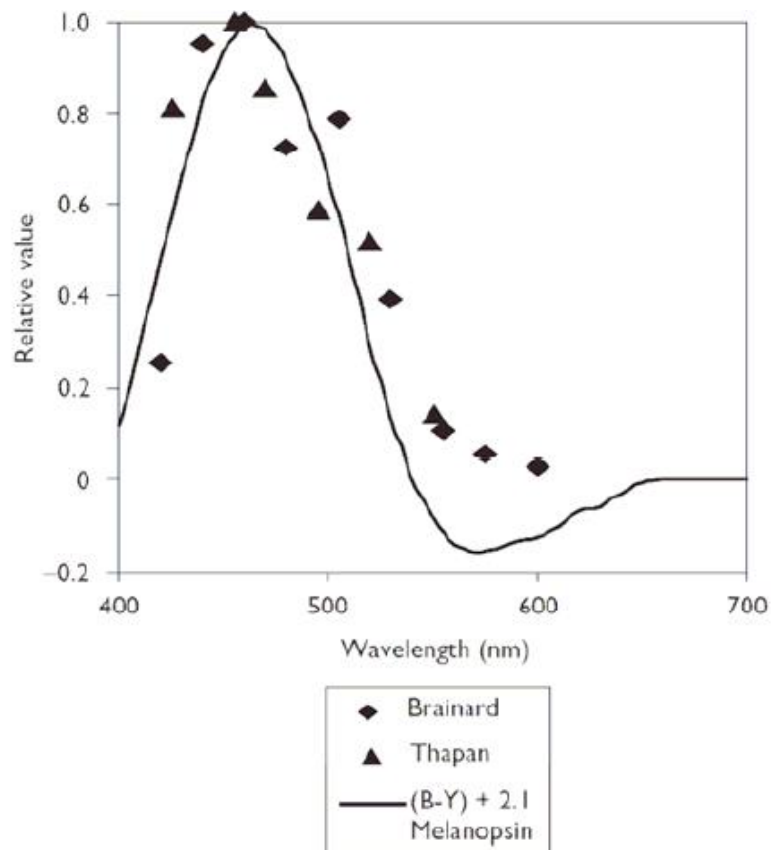
Figueiro<sup>20,21</sup> e Rea<sup>22</sup> hanno pubblicato i risultati di una ricerca dove sono stati comparati gli effetti della soppressione della melatonina di due differenti spettri luminosi: LED blu e una lampada ai vapori di mercurio ad alta pressione da 400 W. I valori di illuminamento alla cornea generati dalle due sorgenti risultavano pari rispettivamente a 18 lux per il LED e a 450 lux per la lampada a scarica.

Il livello effettivo di radiazione, pesato con la curva di Brainard (spettro di azione per la soppressione della melatonina negli esseri umani, durante la notte<sup>23</sup>) per la lampada al mercurio era circa il doppio di quello della sorgente LED, ma la soppressione della melatonina era circa la metà rispetto a quella del LED blu.

La spiegazione fornita dagli autori dello studio fu quella che le componenti gialle dello spettro della lampada, riducono la soppressione della melatonina durante le ore notturne: in altre parole, in alcune circostanze l'effetto dello spettro completo può essere minore dell'effetto delle singole componenti spettrali.

Questo comportamento può essere tenuto in conto nella descrizione dello spettro di efficacia nella soppressione della melatonina, mediante un nuovo andamento della curva, come illustrato alla Figura 9.

Come si vede dalla Figura 9, la curva presenta dei valori negativi per tenere in considerazione gli effetti di "compensazione" delle lunghezze d'onda più lunghe nella soppressione della melatonina.



**Figura 9 Spettro di azione per la soppressione della melatonina per sorgenti policromatiche (sorgente con spettro equi-energetico)<sup>a</sup>**

In uno studio successivo, Rea <sup>24</sup> ha comparato gli effetti di quattro differenti lampade fluorescenti (diversa tonalità della luce 2700K, 3000K, 4100K, 5500K): sono stati considerati gli effetti della soppressione della concentrazione di melatonina nel sangue, per ciascuna lampada, a due differenti livelli di illuminazione (300 lux e 600 lux), dopo un'ora di esposizione durante le ore notturne.

Per tutte le lampade, gli è verificato un maggiore livello di soppressione della melatonina nel sangue in corrispondenza del valore più elevato di illuminazione (600 lux), indipendentemente dalla temperatura correlata di colore considerata.

Un altro importante risultato della ricerca fu quello di mostrare come il valore della temperatura correlata di colore, non fosse un buon indicatore dell'efficienza della soppressione della melatonina durante le ore notturne: lampade con CCT bassa producono risultati uguali o maggiori di lampade con tonalità più fredda a parità di livello di illuminazione.

<sup>a</sup> Figueiro, M. G.; Bullough, J. D.; Parsons, R. H.; Rea, M.S.: Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans, Neuroreport 5, pp. 313-316, 2004

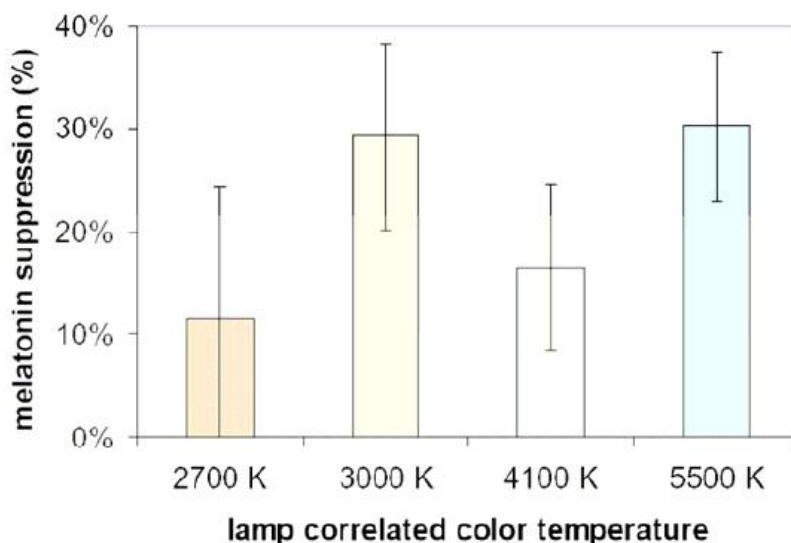


Figura 10 Soppressione della melatonina (durante le ore notturne) in funzione della temperatura i colore della sorgente fluorescente (300...600 lux)

### 3.2 Dipendenza dell’effetto di soppressione dalla posizione dell’illuminazione sulla retina

Alcuni studi sono giunti alla conclusione che differenti aree della retina dell’occhio umano , mostrano una differente sensibilità alla luce. Dallo studio di Glickman e al<sup>25</sup>. si deduce che la luce dall’alto è maggiormente efficiente nella soppressione della melatonina rispetto alla luce proveniente dal basso: questi risultati sono stati confermati anche da altri ricercatori<sup>26,27</sup>.

La luce proveniente dal lato del naso è più efficiente nella soppressione della melatonina nelle ore notturne, rispetto a quella che proviene dalle zone della tempie, come mostrato nel grafico della Figura 12<sup>28</sup>.

I dati si riferiscono ad un’esposizione di 100 lux alla retina e le pupille dei soggetti sono state dilatate prima e durante l’esposizione allo stimolo luminoso al fine di minimizzare l’effetto del diametro della pupilla sulla stima della soppressione della melatonina.

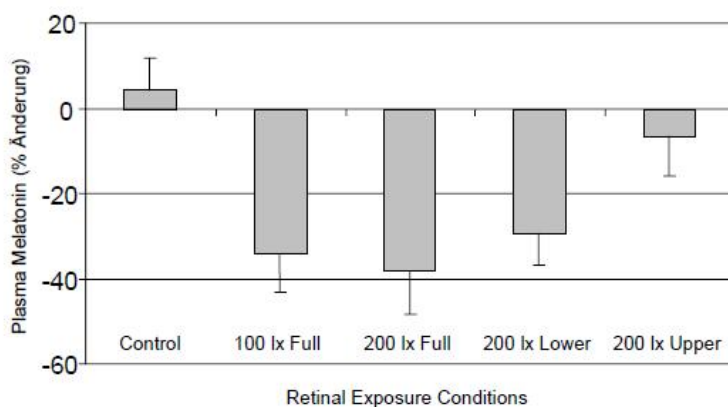
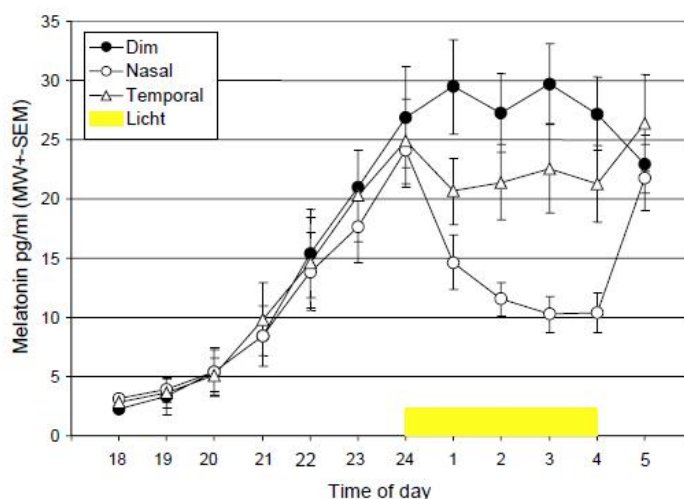


Figura 11 Soppressione della melatonina in funzione della dimensione e della posizione della zona di retina illuminata: Significato dei riferimenti : Full si riferisce alla stimolazione dell’intera retina, Lower illuminata solo la parte inferiore e Upper a quella superiore(Glickman e al.).





**Figura 12 Soppressione della melatonina nelle ore notturne (in giallo è indicata l'esposizione alla luce sull'asse delle ascisse del grafico) in funzione della zona della retina illuminata (emiretina nasale posta medialmente alla fovea e alle due emiretine temporali, poste lateralmente alla fovea). Il confronto è fatto con la concentrazione della melatonina in assenza di stimolo luminoso (Dim: illuminazione dell'intera retina con un livello <10 lux).**

Le considerazioni precedenti suggeriscono che gli effetti di attivazione della luce ad elevata temperatura correlata di colore, possono essere migliorati attraverso sorgenti di luce planari o secondarie (illuminazione indiretta), utilizzando il soffitto o le pareti<sup>29</sup>.

### 3.3 Dipendenza temporale

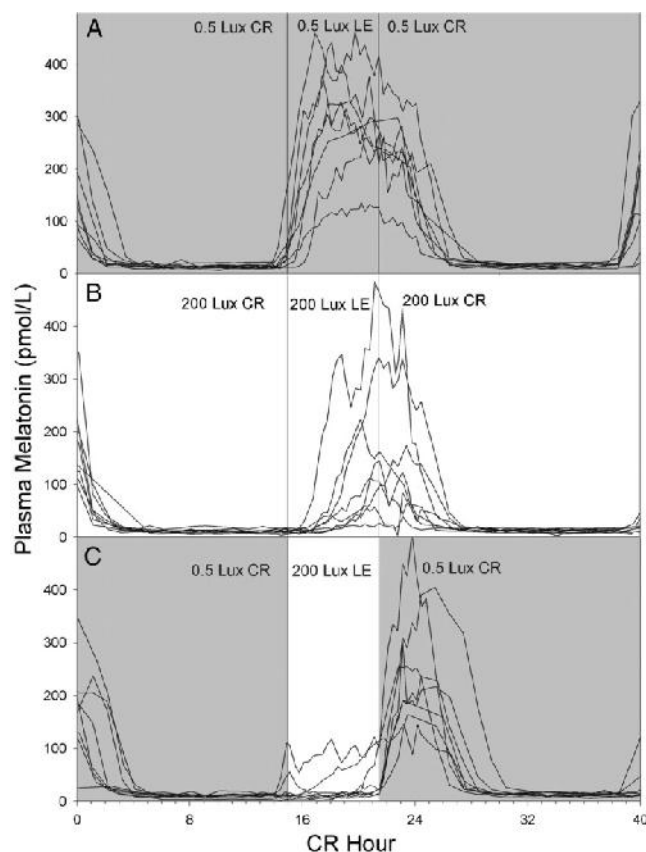
Alcuni studi hanno mostrato come le scene di luce prima dei test (stimolo e valutazione della soppressione della melatonina), influenzano l'effetto della stimolazione.

La Figura 13, mostra che nei casi B e C l'effetto sulle secrezioni della melatonina dell'esposizione a 200 lux per 6.5 h, considerando due differenti condizioni iniziali: 200 lux nel caso B e 0.5 lux nel caso C. I livelli sono stati ottenuti con lampade fluorescenti a 4100K per entrambi i casi. L'esame dei risultati mostra un andamento molto differente nel tempo dei tracciati: livelli simili o uguali di illuminamento prima e durante il test (casi A e B) mostrano un impatto minore sul livello della melatonina rispetto a una brusca variazione di livello (caso C).<sup>30</sup>

Altri studi<sup>31,32,33</sup> hanno cercato di comparare gli effetti di stimolazioni molto rapide, con elevati valori di illuminamento rispetto a scenari di illuminazione continua. In tutti questi casi, elevati livelli di illuminamento sono applicati per intervalli di tempo ristretti interrotti da 30-80 minuti di oscurità, sulla base della considerazione che l'effetto di saturazione può essere raggiunto in 10-15 min., ottenendo gli stessi effetti sulla soppressione della melatonina di una stimolazione continua con lo stesso livello di illuminamento di quella pulsata.

L'illuminazione a elevati livelli, con esposizione intermittente e di durata limitata, potrebbe essere utilizzata nell'illuminazione dei luoghi di lavoro<sup>a</sup>, illuminando con livelli elevati (6000 lux) la caffetteria o le zone di break e creando una temporizzazione molto precisa delle pause in modo tale che i soggetti siano esposti con il timing corretto e per un periodo di tempo prefissato al livello di illuminazione desiderato.

<sup>a</sup> Non è pensabile infatti mantenere elevati valori di illuminamento per periodi prolungati a causa dei notevoli consumi energetici



**Figura 13** Concentrazione della melatonina nel sangue rilevata al trascorrere del tempo (sono riportate le concentrazioni relative a 8 soggetti) per tre differenti scenari luminosi. Lo stimolo è costituito, per tutti i casi da 6.5 h di esposizione a 200 lux , mentre la situazione luminosa prima e dopo lo stimolo è differente nei 3 casi.

### 3.4 Rischi per la salute

Occorre però ricordare che l'attivazione circadiana utilizzata senza riguardo per l'ora della giornata e per il naturale ritmo circadiano, accanto ad effetti desiderati come l'aumento della vigilanza e dell'attenzione degli individui, può comportare anche gravi disordini metabolici<sup>34,35</sup>.

Durante la notte, l'esposizione alla luce previene la produzione di un ormone, la melatonina che svolge importanti azioni nei processi di rigenerazione e riparazione; questo ormone protegge anche le cellule da possibili danni dovuti alla presenza di radicali liberi.<sup>a</sup>

Nel 2007 un'agenzia delle Nazioni Unite, The International Agency for Research on Cancer, concluse che un lavoro a turni, produce una modificazione del ritmo circadiano (dovuto in parte a una eccessiva esposizione alla luce), è una possibile causa di tumore per l'uomo<sup>36</sup>.

Nel documento citato, si legge: "Epidemiological studies have found that long-term night workers have a higher risk of breast cancer than women who do not work at night.[...]The studies are consistent with animal studies that demonstrate that constant light, dim light at night, or simulated chronic jet lag can substantially increase tumour development. Other experimental studies show that reducing melatonin levels at night increases the incidence or growth of tumours."

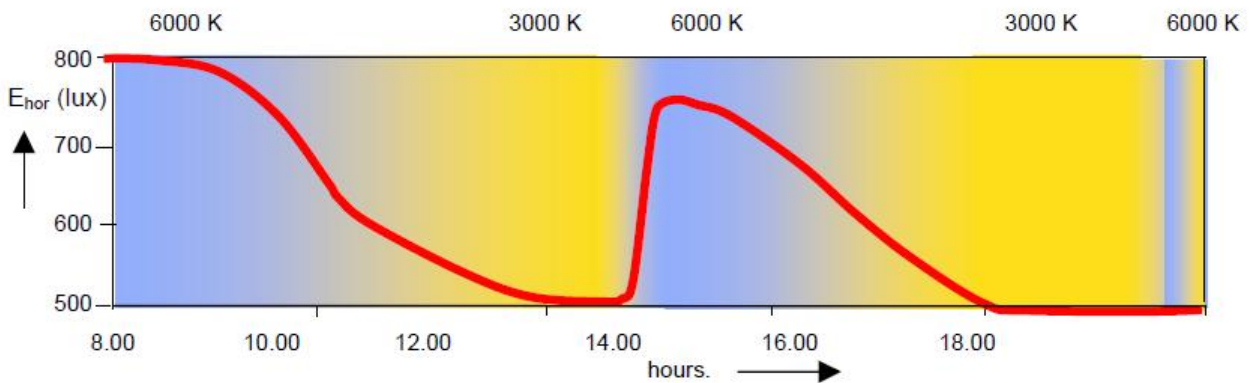
Per maggiori approfondimenti su questo tema si rimanda alla bibliografia<sup>37,38,39</sup>

### 3.5 Variazione dinamica dell'illuminazione

Attraverso una variazione dinamica dell'illuminazione durante il giorno, è possibile migliorare il benessere : ad elevati valori di illuminamento ed elevate temperature di colore nel primo pomeriggio , seguono valori

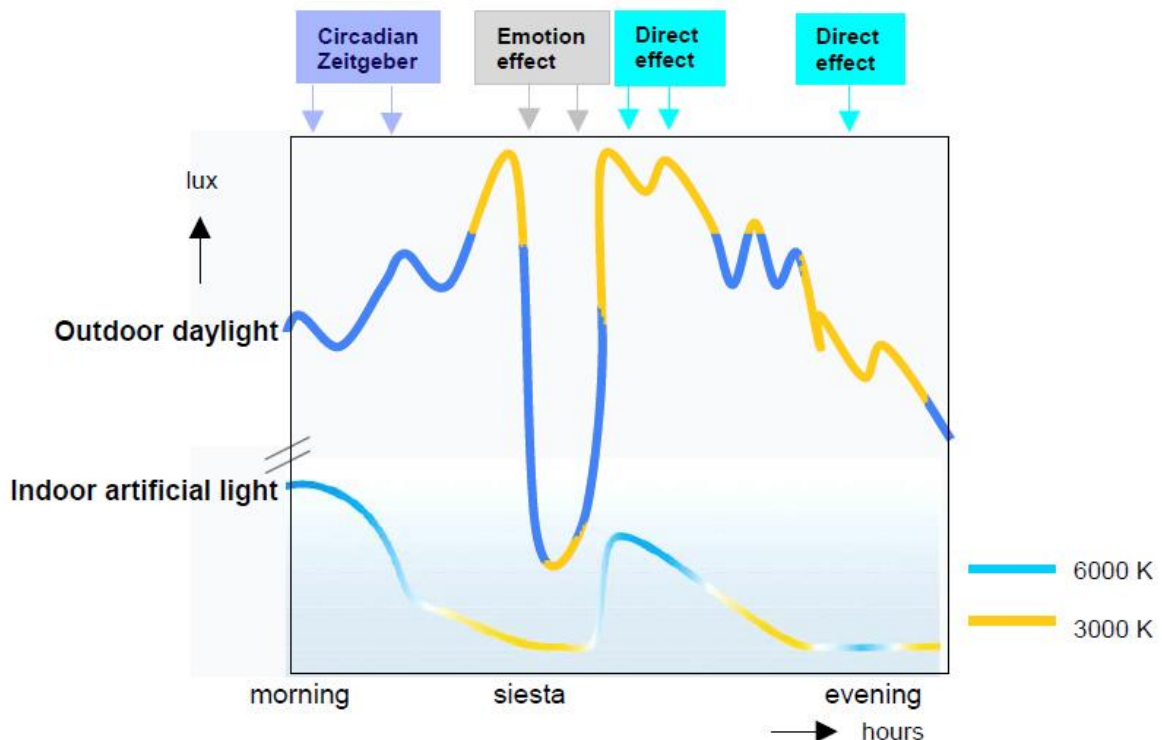
<sup>a</sup> Una panoramica su questo argomento può essere reperita in Erren, T.C., Reiter, R.J., Piekarski, C. (2003): Light, timing of biological rhythms, and chronodisruption in man. *Naturwissenschaften*, Vol. 90 Nr. 11 S. 485-494.

più modesti di illuminamento e tonalità della luce più calda verso la sera, in modo da contribuire all'instaurarsi di un ritmo circadiano "stabile"<sup>40,41</sup>.



**Figura 14** Scenario di luce che gradualmente cambia il livello di illuminazione (linea rossa) e la temperatura correlata di colore da 6000K (area del grafico a sfondo blu) verso 3000K (area del grafico gialla), in accordo con il ritmo circadiano<sup>a</sup>

In un ambiente di lavoro, occorre stimolare, attraverso la luce, due situazioni contrapposte: azione e rilassatezza. I livelli di illuminamento e la tonalità della luce possono essere usati per creare le condizioni necessarie affinché questo sia possibile. La Figura 14, mostra un esempio di scenario luminoso in cui i livelli e la temperatura correlata di colore variano in accordo con il ritmo circadiano. I livelli di illuminamento sono riferiti al piano orizzontale.



**Figura 15** Esempio di come la luce naturale crea differenti effetti in diversi momenti della giornata, messo a confronto con il ritmo della luce artificiale dinamica, in un ambiente di lavoro. La variazione del colore rappresentato sulla curva della luce naturale (giallo e blu), illustra la variazione casuale della temperatura di colore, mentre i colori sulla luce artificiale vogliono rappresentare la graduale variazione della temperatura di colore da 6000K a 3000K.

<sup>a</sup> Fonte: Philips linea Dynamic Lighting

La Figura 15, mostra gli effetti prodotti dalla luce naturale in un interno, in differenti momenti della giornata, messi a confronto con l'andamento della luce artificiale: alla mattina, lo scenario inizia con una stimolazione, con valori relativamente elevati di illuminamento e temperature correlate di colore fredde, (attorno ai 6000K) aiutano a mantenere il periodo delle 24 ore il ritmo circadiano umano, soprattutto per quei lavoratori che si recano a lavoro nei mesi invernali quando è ancora buio. Successivamente la luce si sposta verso tonalità più calde e a valori di illuminamento più bassi, in modo da conseguire un risparmio energetico. Verso l'ora di pranzo viene raggiunto il valore minimo di illuminamento, compatibile con il compito visivo richiesto ai lavoratori (500 lux), con una tonalità di colore calda 3000K, in modo da creare un'atmosfera rilassante e piacevole.

La possibilità di creare un'atmosfera rilassante e piacevole, è importante dato che molte ricerche mostrano l'efficacia di sonnellini brevi e ultra-brevi all'ora di pranzo, con effetti positivi e duraturi sul livello di attenzione e performance cognitiva nel pomeriggio<sup>42,43,44</sup>.

Dopo pranzo, una rapida risalita dei livelli di illuminazione e della temperatura di colore (luce bianca fredda), stimola i soggetti esposti (la temperatura di colore fredda e i livelli elevati possono essere in contrasto con gli effetti emozionali dell'ambiente, ma si ritiene che gli effetti fisiologici dell'illuminazione debbano prevalere).

Durante il pomeriggio, sia i livelli medi di illuminamento, sia la temperatura di colore, gradualmente diminuiscono (in modo da garantire un risparmio energetico). Proprio sul finire della giornata lavorativa un breve "boost" di luce bianco fredda viene fornito al lavoratore (senza aumento di livello, per ragioni di risparmio energetico), per "risvegliare" il lavoratore per il viaggio verso casa.

Le sorgenti di luce fino a ora utilizzate, erano in prevalenza lampade fluorescenti lineari, con differenti temperature di colore e indice di resa cromatica Ra pari a 80.

L'ente di normazione Olandese per l'Applicazione della luce, "De Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde" (NSVV, The Dutch Society for Light Applications) ha proposto criteri per l'illuminazione dei luoghi di lavoro che favoriscano il benessere per gli occupanti (2003)<sup>a</sup>.

Secondo i suggerimenti del NSVV, le condizioni di illuminazione durante il giorno dovrebbero variare in modo dinamico nel corso della giornata, con "boost" di luce intensa al mattino (soprattutto il Lunedì), e successivamente nel dopo- pranzo e in serata prima che i lavoratori escano dall'ufficio. Il livello di boost è raccomandato nella gamma tra i 1000 a 1500lx e la temperatura di colore raggiunge circa 10000K (il riferimento è a lampade fluorescenti).

## 4 Conclusioni preliminari sui sistemi di illuminazione circadiana negli uffici

Sulla base della letteratura scientifica ad oggi disponibile, possiamo trarre le seguenti conclusioni:

- Esistono certamente degli effetti non visibili della luce, il cui studio e valutazione all'interno del progetto illuminotecnico può contribuire al miglioramento del benessere dei luoghi di lavoro.
- Gli effetti della luce policromatica<sup>b</sup> sul ciclo circadiano sono stati indagati da un numero molto limitato di studi e quindi non sono ancora stati definiti in modo preciso e accurato. Ad esempio, nessuno dei modelli di fotometria circadiana può essere ritenuto completamente validato o rifiutato, sulla base delle evidenze sperimentali ad oggi note<sup>45</sup>.

La validità della classificazione di sorgenti in base al loro effetto sul sistema circadiano, sulla base della loro sola emissione spettrale, risulta, ad oggi, ancora problematica.

- Ci sono ricerche o studi che mostrano che anche altri fattori, oltre alla distribuzione spettrale delle sorgenti, hanno un effetto sulla soppressione della melatonina. Se ne ricordano solo tre, esaminati nei precedenti paragrafi: la distribuzione spaziale della stimolazione luminosa sulla retina (implica che cosa è meglio illuminare, come ad esempio il soffitto o la parte superiore delle pareti), in quale ora della giornata interviene la stimolazione, gli scenari luminosi che hanno preceduto la

<sup>a</sup> NSVV Commissie Licht en Gezondheid (2003). Licht en gezondheid voor werkenden: aanbevelingen.

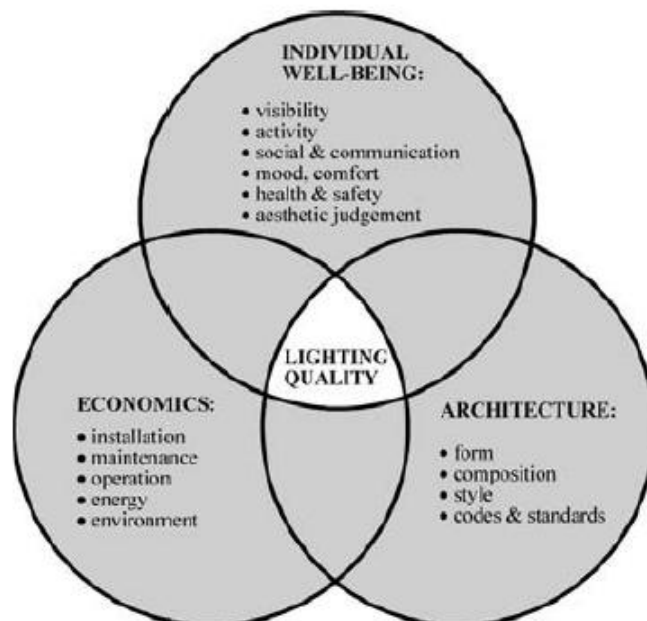
<sup>b</sup> Le sorgenti policromatiche sono quelle di maggior interesse per il progettista illuminotecnico

stimolazione (livello, spettro, durata). Tutti questi elementi devono essere inseriti all'interno del modello di foto-trasduzione al fine di valutare gli effetti della luce prodotta dall'impianto di illuminazione sugli occupanti.

- L'attuale stato di conoscenza non è sufficiente per proporre e sviluppare un modello di illuminazione circadiana che abbia effetti prevedibili a priori (e misurabili) sul sistema circadiano degli occupanti<sup>a</sup>. E' certo possibile progettare e realizzare delle installazioni di studio che consentano di valutare, in una situazione simile a quella reale, i modelli di previsione che le future ricerche metteranno a punto.

## 5 Efficienza Energetica-Qualità della luce-Benessere

Una possibile rappresentazione della qualità della luce è il risultato della corretta integrazione di tre differenti ambiti: i bisogni dell'individuo nell'ambiente, le caratteristiche architettoniche dello spazio e del contesto economico e ambientale del progetto<sup>46</sup>.



**Figura 16 Modello generale per la rappresentazione della qualità della luce.**

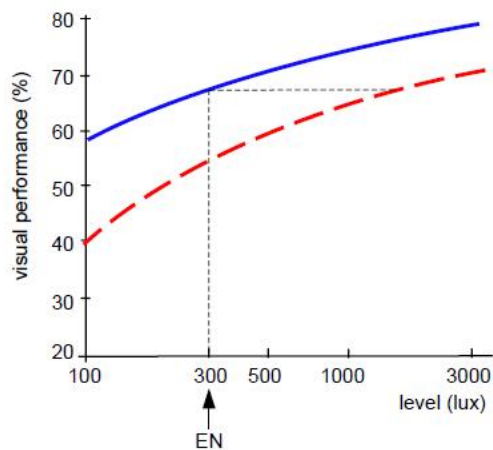
Ad oggi si hanno consolidate conoscenze sugli effetti della luce sulla visione, meno noti sono i legami tra l'illuminazione e le sensazioni di benessere, la salute e la piacevolezza dello spazio per gli occupanti<sup>47</sup>.

I livelli di illuminazione dovrebbero essere sempre tali da garantire una performance visiva sufficiente a svolgere la performance visiva connessa con il compito visivo assegnato.

Le ricerche sulla qualità e la quantità di luce (in senso ampio del termine), svolte nel corso dei passati decenni, hanno mostrato che il miglioramento della qualità dell'illuminazione da livelli bassi o moderati, si accompagna sempre a un aumento della velocità e dell'accuratezza con cui gli oggetti sono percepiti e riconosciuti.

Le performance visive di un soggetto dipendono sia dalla qualità dell'illuminazione e dall'abilità visive proprie dell'individuo: in questa ottica l'età rappresenta un fattore decisivo per la determinazione dei requisiti illuminotecnici.

<sup>a</sup> Ad oggi è possibile modificare in modo controllato l'andamento del livello di melatonina nel sangue, solo in casi molto semplici (condizioni controllate): si veda a tale proposito A Barroso and B den Brinker, "Boosting circadian rhythms with lighting: A model driven approach", Lighting Res. Technol. 2013; 45: 197–216 per la creazione di un ciclo di stimolazione luminosa in pazienti in rianimazione per ridurre l'incidenza di episodi di delirio.



**Figura 17 Relazione tra la performance visiva (in percentuale) e il livello di illuminamento in lux per un compito visivo moderatamente difficoltoso. La linea continua blu è relativa a persone giovani (circa 30 anni), mentre la linea tratteggiata è relativa a persone più anziane (circa 55 anni). Con EN è stato indicato il requisito della norma Europea<sup>48</sup>**

Alcuni esperimenti condotti in set-up simili ad un ufficio (sviluppati per verificare precedenti risultati di laboratorio), hanno dimostrato che, per occupanti temporanei di uno spazio, si registra una significativa preferenza degli spazi illuminati con una combinazione di luce diretta e indiretta<sup>49,50,51</sup>.

Si è inoltre verificato che un controllo personale sull'illuminazione del posto di lavoro, porta a benefici quali una migliore percezione dell'ambiente lavorativo e un ridotto consumo energetico<sup>52,53</sup>.

Inoltre, le persone che hanno espresso giudizi favorevoli sulla qualità dell'illuminazione, tendono a esprimere giudizi maggiormente favorevoli nei confronti dell'apparenza dell'ambiente, dello stato d'animo, e una maggiore sensazione di benessere al termine della giornata lavorativa<sup>54</sup>.

La mappa ipotizzata delle connessioni tra condizioni luminose e salute, benessere, performance visiva, sono riassunte alla Figura 18: la stessa mappa è stata utilizzata anche per compiere uno studio sul campo<sup>55</sup> per verificare la veridicità delle osservazioni e delle conclusioni estratte dagli studi di laboratorio condotti per periodi di tempo limitati e su set-up che riproducevano solo alcune delle condizioni ambientali di un ufficio (lo studio citato ha utilizzato degli ambienti di lavoro reali, interessati da lavori di ristrutturazione degli impianti e degli arredi). I soggetti interessati dallo studio, con età media di 41 anni, divisi in 3 differenti fasi, sono stati numerosi, 1750 persone hanno partecipato almeno una volta.

Le linee nere continue mostrano le relazioni osservate negli esperimenti precedenti, le linee puntinate blu, sono le relazioni individuate da altre ricerche, le linee tratteggiate rosse sono le inferenze logiche. I rettangoli grigi sono i dati di archivio, mentre quelli bianchi sono le variabili misurate dal team di sperimentatori.

I risultati hanno mostrato che una illuminazione specifica della postazione di lavoro con emissione diretta e indiretta con controllo individuale dell'emissione diretta è preferita rispetto a una soluzione di illuminazione con apparecchi a incasso con riflettore parabolico e schermo lamellare. Il risultato è particolarmente interessante perché conferma i precedenti studi, condotti in laboratorio.

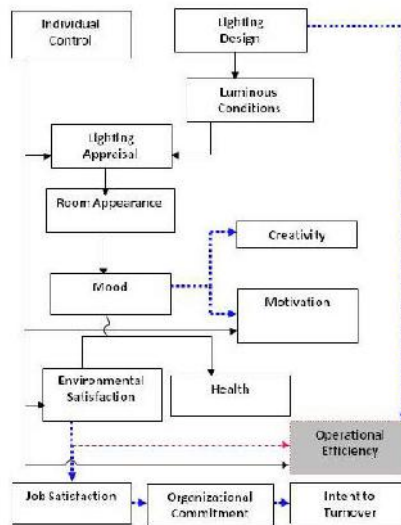


Figura 18 Mappa dei legami tra condizioni luminose, benessere, salute<sup>a</sup>

## 6 Personalizzazione

In letteratura ci sono parecchi studi sull'impiego delle task light in aggiunta all'illuminazione generale, attraverso una serie di esperimenti psicofisici.

Yamakawa et al.<sup>56</sup> ha condotto degli esperimenti psicofisici, dove i partecipanti hanno settato i livelli più appropriati dell'illuminazione del posto di lavoro, per tre livelli dell'illuminazione generale (200 lux, 300 lux, 400 lux), mentre svolgevano differenti lavori di ufficio.

Sulla base dei risultati ottenuti, è stato concluso che un illuminamento generale di 200 lux comporta alcuni problemi quando si svolgono lavori di ufficio di vario tipo (lavoro sul tavolo, vicino al tavolo, conversazione al telefono, lavoro al videoterminale), per lunghi periodi; un valore di 300 lux per l'illuminazione ambientale consegue giudizi sostanzialmente positivi, con un rapporto tra illuminazione generale e illuminazione localizzata della postazione di lavoro pari circa a 1.0.

Considerando un livello di 750 lux come valore di illuminamento sul piano di lavoro, con una densità di potenza pari a 20 W/m<sup>2</sup>, si consegue una riduzione del 20% della potenza impiegata mediante l'utilizzo di una task light.

Altri studi si sono occupati di valutare l'illuminazione della zona di lavoro in un ambiente ufficio realistico: un totale di 10 impianti che presentavano una vasta gamma di differenti caratteristiche illuminotecniche sono state valutate da diversi tipi di impiegati, durante l'esecuzione di attività tipiche di un ufficio, simulando la presenza di quattro persone. Le valutazioni dei partecipanti sono state rilevate con un questionario e i risultati hanno dimostrato che gli schemi di illuminazione localizzata/generale riducono notevolmente i livelli di illuminazione complessivamente richiesti da una illuminazione generale, conservando un buon giudizio di apprezzamento complessivo da parte dei soggetti intervistati<sup>57</sup>.

Le principali conclusioni sulla base della bibliografia scientifica, sono che l'impiego della task light (come una lampada da tavolo), rende possibile ottenere un ambiente luminoso accettabile, con un ridotto impiego di potenza elettrica.

In linea generale, possiamo stimare una riduzione del 27.5% della potenza, dovuta all'utilizzo delle task light, in rapporto alle installazioni che prevedono la sola illuminazione generale, per il raggiungimento del livello di illuminamento ottimale sul compito visivo. Il risultato è consistente, con i risultati descritti in letteratura<sup>58,59,60</sup>, in modo particolare con quei compiti visivi che riguardano la gestione/elaborazione di documenti cartacei.

<sup>a</sup> J. Veith, G. Newsham, C. Jones, C. Arsenault, S. Mancini, "High quality lighting: Energy Efficiency that enhances employee well-being", Proceeding of CIE 2010, "Lighting Quality and Energy Efficiency"

## 7 Possibili soluzioni tecnologiche per il sistema ottico

Il progetto del sistema ottico risulta di fondamentale importanza per l'illuminazione degli uffici: il controllo dell'abbagliamento, l'efficienza e una corretta distribuzione della luce sono alla base di qualsiasi prodotto sviluppato per questo specifico campo di applicazione.

In questo paragrafo verranno analizzate alcune soluzioni tecniche descritte in letteratura o liberamente disponibili sul mercato per il controllo, la distribuzione e l'efficienza di un apparecchio di illuminazione, cercando di mettere in evidenza pregi e difetti delle diverse possibilità.

### 7.1 Sistemi ottici a riflessione

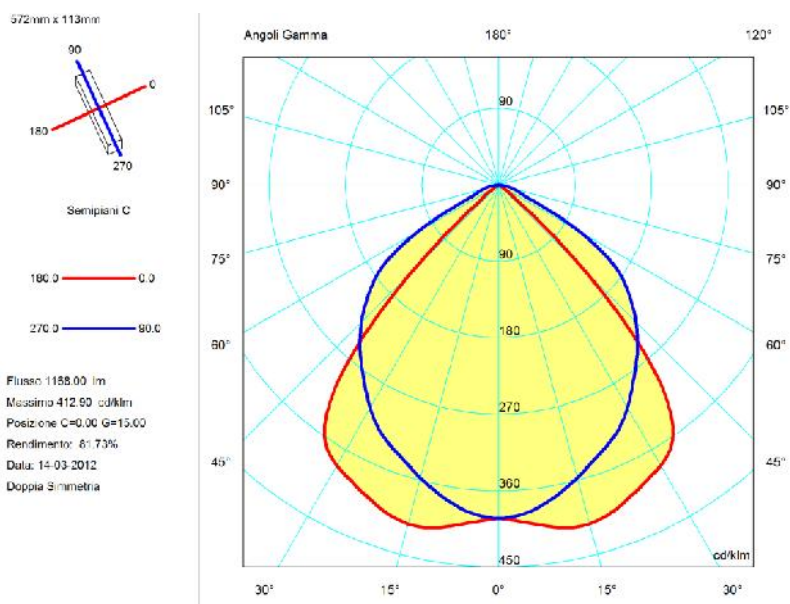
Il primo caso considerato è quello del sistema ottico lineare a riflessione, appositamente studiato per la limitazione dell'abbagliamento ( $UGR \leq 19$ ). Le sorgenti utilizzate possono essere dei power LED o dei COB.



**Figura 19 Ottica lineare riflettente per uffici (limitazione abbagliamento a  $UGR \leq 19$ ). Cortesia Jordan modello DIN EN-12464 - UGR19.**

Il sistema ottico può prevedere anche la presenza di un diffusore per la miscelazione dell'emissione luminosa dei diversi LED impiegati (il progetto del riflettore, potrebbe essere semplificato se si ipotizzasse l'esistenza di una sola sorgente, con emissione approssimativamente lambertiana).

Il sistema consente di ottenere distribuzioni fotometriche tipicamente utilizzate nell'illuminazione di uffici, molto simili a quelle che si otterrebbero con lampada fluorescente lineare e ottica con alette per limitare l'abbagliamento (vedi Figura 20).



**Figura 20 Indicatrici di emissione sui piano C0-180° e C90-270 dell'ottica Jordan modello DIN EN-12464 - UGR19**



Il rendimento del sistema è pari a 82% circa, mentre la tabella UGR, riportata alla Figura 21, mostra che per indici di riflessione (ceiling/cavity=0.7,walls=0.5,working plane=0.2), per un locale 4H/8H, il valore massimo dell'indice di abbagliamento è pari a 15.

<b>Apparecchio</b>	<b>Rilievo</b>	<b>Lampada</b>
Codice Part No.: 140988S02387 (Miro 20 Silver)	Codice: 20120314-21	Codice: LuguLine
Nome: Jordan Linear LED Louvre, UGR 19, Panasonic LuguLine LED Louvre, UGR 19, Panasonic LuguLine LED Louvre	Nome: Jordan Linear LED Louvre, UGR 19, Panasonic LuguLine LED Louvre	Nome: LuguLine
Archivio: Eclairidal	Data: 14-03-2012	Posizione: 2
Rendimento: 81.73%	Sistema Coordinato: CG	Flusso Totale: 1168.00 lm
Valore Massimo: 412.90 cd/km	Posizione: C-0.00 G-15.00	Doppia Simmetria

UGR  
S = 0.250

Reflectancies										
Ceiling/Cavity	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3
Walls	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
WorkingPlane	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
RoomDimensions	ViewedCrosswise					ViewedEndwise				
x=2H y=2H	14.9	15.9	15.2	16.1	20.4	18.5	20.0	19.2	20.2	20.4
x=2H y=3H	14.8	15.7	15.1	15.9	20.4	19.0	19.9	19.3	20.1	20.4
x=2H y=4H	14.7	15.5	15.0	15.8	20.3	18.9	19.8	19.3	20.1	20.3
x=2H y=6H	14.6	15.4	15.0	15.7	20.3	18.9	19.7	19.2	20.0	20.3
x=2H y=8H	14.6	15.3	14.9	15.6	20.3	18.9	19.6	19.2	19.9	20.3
x=2H y=12H	14.5	15.3	14.9	15.6	20.2	18.9	19.6	19.2	19.9	20.2
x=4H y=2H	15.2	16.1	15.5	16.3	20.2	18.7	19.6	19.1	19.9	20.2
x=4H y=3H	15.1	15.8	15.5	16.2	20.2	18.8	19.5	19.2	19.8	20.2
x=4H y=4H	15.1	15.7	15.4	16.0	20.1	18.8	19.4	19.2	19.7	20.1
x=4H y=6H	15.0	15.6	15.4	15.9	20.0	18.8	19.3	19.2	19.7	20.0
x=4H y=8H	15.0	15.4	15.4	15.8	20.0	18.7	19.2	19.1	19.6	20.0
x=4H y=12H	14.9	15.4	15.4	15.8	20.0	18.7	19.1	19.2	19.5	20.0
x=8H y=4H	15.0	15.5	15.4	15.8	19.9	18.7	19.2	19.1	19.6	19.9
x=8H y=6H	14.9	15.3	15.3	15.7	19.9	18.6	19.0	19.1	19.4	19.9
x=8H y=8H	14.9	15.2	15.3	15.6	19.9	18.6	19.0	19.1	19.4	19.9
x=8H y=12H	14.8	15.1	15.3	15.6	19.8	18.6	18.9	19.0	19.3	19.8
x=12H y=4H	14.9	15.4	15.4	15.8	19.9	18.6	19.1	19.1	19.5	19.9
x=12H y=6H	14.9	15.2	15.3	15.6	19.9	18.6	18.9	19.1	19.4	19.9
x=12H y=8H	14.8	15.1	15.3	15.6	19.8	18.5	18.9	19.0	19.3	19.8

Figura 21 Tabella UGR riflettore lineare Jordan modello DIN EN-12464 - UGR19

Un'altra possibile soluzione è costituita da power LED e da lenti TIR (o riflettori), organizzate su una o più file: in questo caso, viene privilegiata l'efficienza ottica a scapito di altre caratteristiche, come ad esempio il confort, la possibilità di realizzare apparecchi a temperatura di colore variabile e altre ancora (Figura 22).

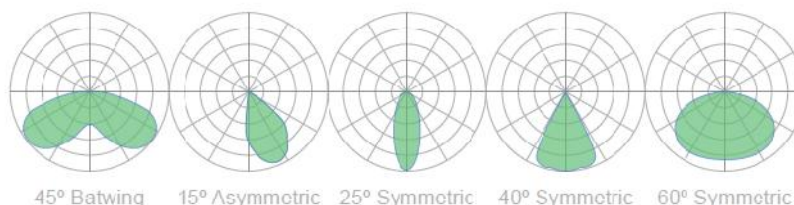


Figura 22 A sinistra è riportato un esempio di riflettore in linea per power LED (Fusion Optics). A destra esempio di distribuzione fotometriche ottenibili mediante l'opportuna scelta del riflettore

Possibili valori aggiunti di questa soluzione sono :

- Controllo della distribuzione luminosa<sup>61</sup>, con possibilità di combinare diverse distribuzioni tra di loro
- Bassi costi di produzione
- Possibilità di realizzare soluzioni custom a costi contenuti, sia dal punto di vista ottico, sia da quello meccanico

Lo schema costruttivo di un apparecchio basato su questa tecnologia, è riportato alla Figura 23: la soluzione dovrebbe garantire, secondo i costruttori, risparmi significativi rispetto alla soluzione basata su power LED e lenti TIR.



Figura 23 Apparecchio costruito da un array di ottiche riflettenti e di Power LED (Fusion Optics).

### 7.2 Guidaluce

Consentono la progettazione di un apparecchio molto sottile, una buona efficienza, un’elevata uniformità, un discreto controllo dell’emissione luminosa al fine di contenere l’abbagliamento e di massimizzare la distribuzione luminosa sul compito visivo.

In questo caso, l’emissione del flusso luminoso può avvenire da un solo lato o da due lati, con differenti fasci luminosi, come mostrato alla Figura 24.

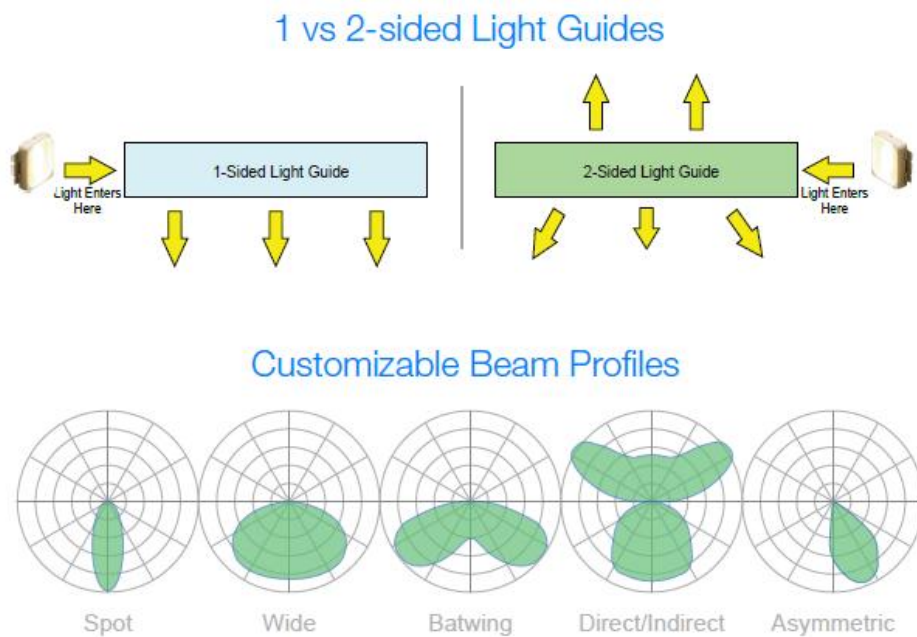


Figura 24 Guida luce con emissione in un solo semispazio o in due semispazi (in alto). In basso differenti profili dovuti alla personalizzazione dell’estrattore della guida.

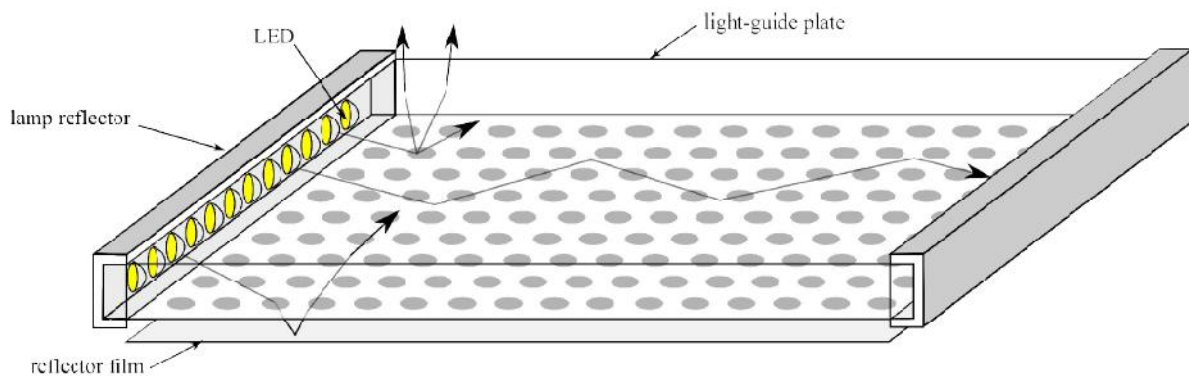
### 7.3 Back light

La tecnologia LED, utilizzata per l’illuminazione di uffici e luoghi di lavoro, sembra promettere grandi risparmi energetici, tuttavia richiede design di prodotto diversi da quelli fino ad oggi utilizzati per garantire che la luce emessa da questi dispositivi, in genere molto intensa ed a elevata luminanza, sia resa confortevole (riduzione dell’abbagliamento) senza perdite eccessive dovute a design di prodotto poco accurato o non studiati.

La tecnologia di back lighting, utilizzata per la realizzazione di schermi e televisioni, LCD, può essere opportunamente sfruttata per creare apparecchi di illuminazione di elevate dimensioni e spessori

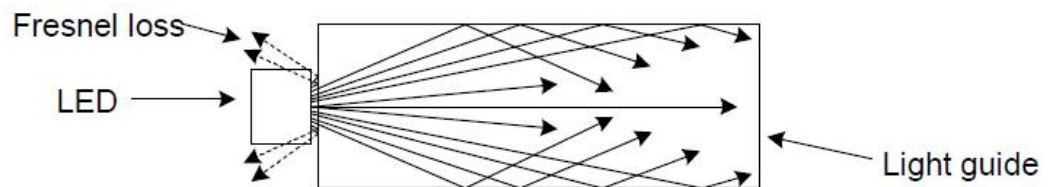
contenute che sfruttino pannelli e pellicole prismatiche per il controllo del flusso luminoso emesso nella task area.

Il design di questo genere di prodotti è di norma basato sullo stesso schema utilizzato dai costruttori di monitor LCD. I LED sono disposti ai bordi dei lati più lunghi di una guida di luce rettangolare ( cfr. con schema di principio della Figura 25).



**Figura 25 Schema apparecchio di illuminazione back light<sup>a</sup>**

Le sorgenti sono poste all'interno di una cavità con pareti riflettenti, al fine di minimizzare le perdite (Fresnel loss): la luce che entra nella guida viene condotta per riflessione interna totale al suo interno. Si osserva che i lati della guida privi delle sorgenti, sono ricoperti da una pellicola riflettente (diffusa o specchiante), al fine di minimizzare le perdite (luce che esce dalla guida in direzioni non utili o desiderate dal progettista). Soluzioni alternative prevedono l'impiego di un riflettore<sup>b</sup> che segua il perimetro della guida: in ogni caso i raggi luminosi che incidono sui bordi con angoli inferiori a quello limite (che ne uscirebbero in assenza di un qualsivoglia accorgimento costruttivo), vengono riflessi (con perdita) all'interno della guida stessa.



**Figura 26 Accoppiamento tra LED e guida: parte della luce emessa dal LED non entra nella guida ma viene riflessa in direzione opposta a quella desiderata**

Al fine del raggiungimento delle massime performance luminose, è importante progettare un sistema con buone prestazioni nell'accoppiamento tra guida luce e sorgenti LED (Figura 26). La Figura 27, mostra le diverse possibilità offerte nella realizzazione di questo particolare e i relativi vantaggi e svantaggi di ciascuna soluzione esaminata.<sup>c</sup>

La soluzione prescelta risulterà il giusto compromesso tra efficienza ottica, ingombro, uniformità del pattern luminoso generato, economicità della lavorazione meccanica della guida o della sorgente luminosa prescelta.

L'accoppiamento può essere anche realizzato mediante un riflettore ellittico (Figura 29), in cui i LED è posto nel primo fuoco e il centro della guida è posto nel secondo fuoco: questa soluzione consente l'utilizzo di power LED che possono essere montati in posizioni differenti rispetto a quelle illustrate nella Figura 27, consentendo una maggiore libertà nel progetto del sistema di dissipazione.

<sup>a</sup> Kenny Ranerup, "Prestudy: Efficient area luminaries based on brightness enhancing film and LED", Report 09/04/2010, CIT Recycling Development AB

<sup>b</sup> Ying Hao, Nikos Bamiedakis, Aeffendi H. Hashim, Richard V. Penty and Ian H. White, "Design Study of Light-Guiding Plate in Backlighting System", Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010 Asia

<sup>c</sup> OSRAM Opto Semiconductor, Light Guides Application Note, March 2012

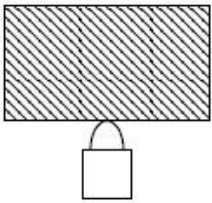
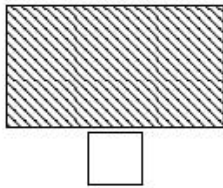
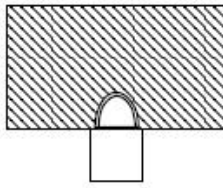
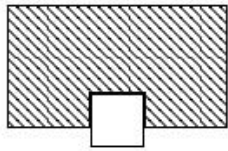
Set on Light Guide		"Inside" Light Guide	
Lens	Flat	Lens	Flat
			
- Transition from LED to light guide (interface)	- Transition from LED to light guide (interface) without index-matching	+ good interface LED to light guide	+ good interface LED to light guide
- Large distance caused by lens	+ slight distance (space saving)	- Hole in light guide (tooling costs)	- hole in light guide (tooling costs)
- narrow incidence angle - long hot spot	+ slight hot spot length, better with index-matching (but cost intensive)	- long hot spot	+ slight hot spot length, better with index-matching + wide incident angle
		- mounting depth	- mounting depth

Figura 27 Diverse possibilità di accoppiamento tra i LED e la guida di luce.

Con riferimento alla Figura 25, si osserva la presenza di un pattern di punti diffondenti sulla superficie inferiore della guida di luce<sup>62</sup>: la loro funzione primaria è quella di riflettere verso l'alto la luce incidente sulla faccia inferiore della guida, consentendone la fuoriuscita. La densità del pattern di punti varia lungo la guida per compensare la diminuzione del flusso disponibile al crescere della distanza dalle sorgenti di luce (Figura 28).

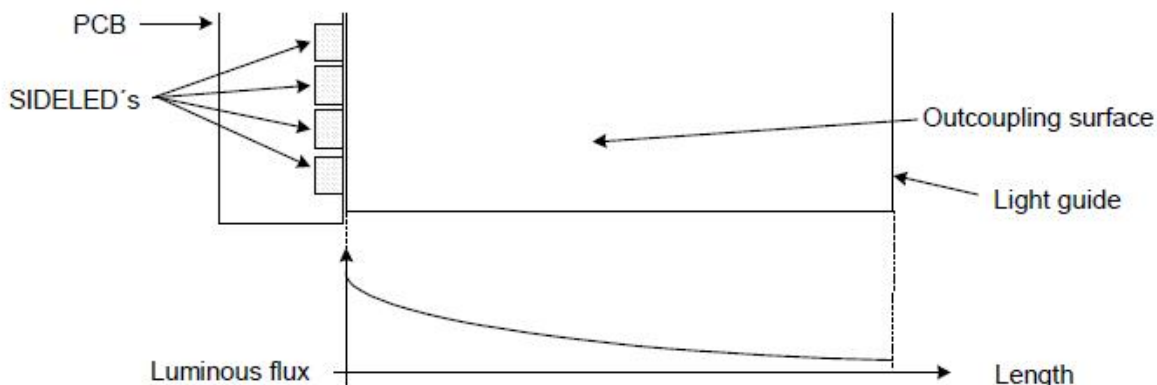
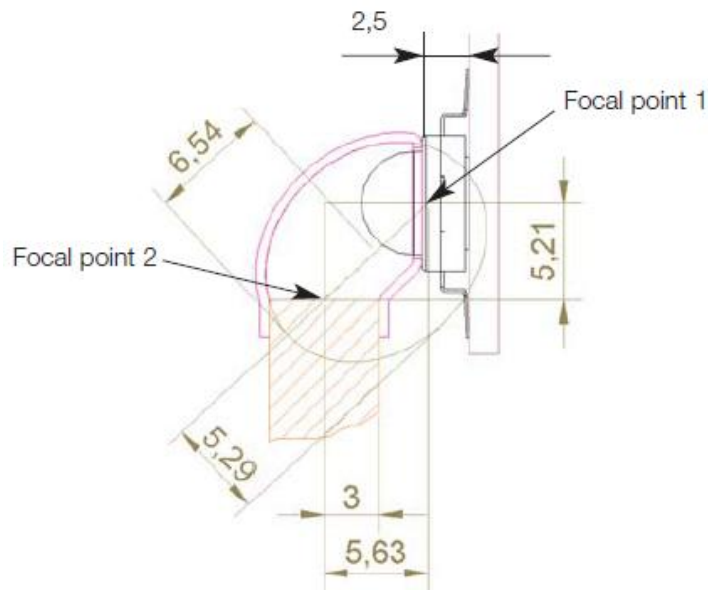


Figura 28 Diminuzione del flusso luminoso lungo la guida

Tutto il flusso luminoso indirizzato verso la parte inferiore della guida, causato dal pattern di punti diffondenti o dall'incidenza con angoli diversi da quelli che assicurano la riflessione interna totale, è

nuovamente riflesso all'interno della guida mediante una pellicola riflettente posta nella parte inferiore della guida di luce.



Elliptical Shape of a 90° Mirror

Figura 29 Utilizzo di un riflettore ellittico per l'accoppiamento tra guida luce e LED<sup>a</sup>

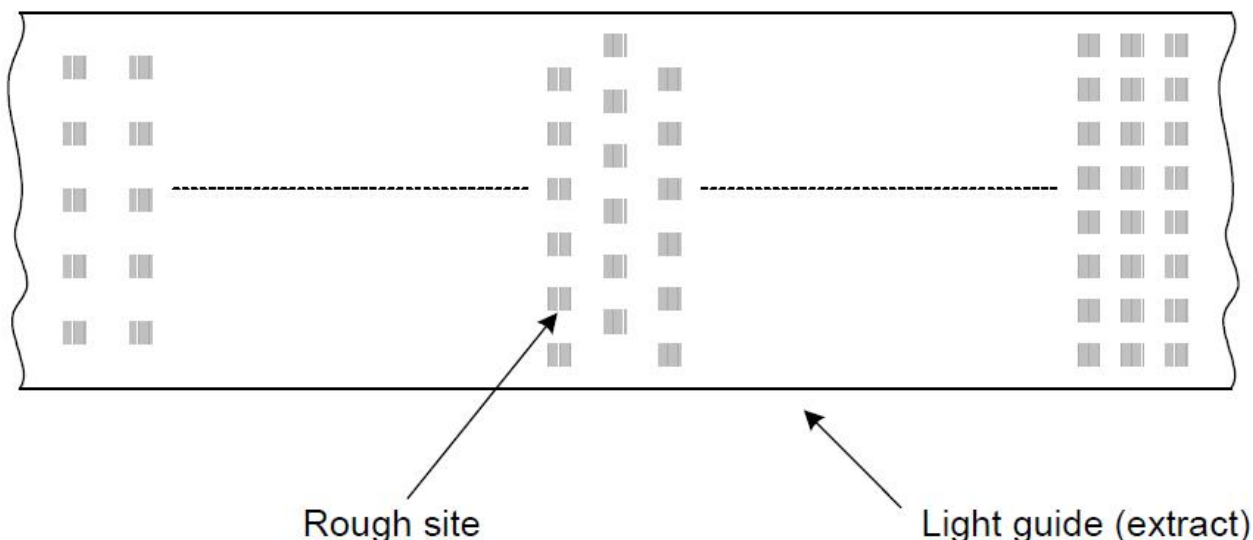


Figura 30 Esempio di dots pattern<sup>b</sup>

Un'altra possibilità per la costruzione di un estrattore consiste nella realizzazione di piccoli punti ruvidi sulla superficie posteriore della guida di luce (Figura 31). Anche in questo caso variando la densità di questi punti, è possibile variare la quantità di flusso luminoso estratto.

<sup>a</sup> Lumileds, Luxeon DCC for LCD Backlighting Application Brief AB27, (1/05)

<sup>b</sup> Josef Hüttner, "LED Display Backlighting – Monitor Applications using 6-lead MULTILED", Application Note, OSRAM semiconductor

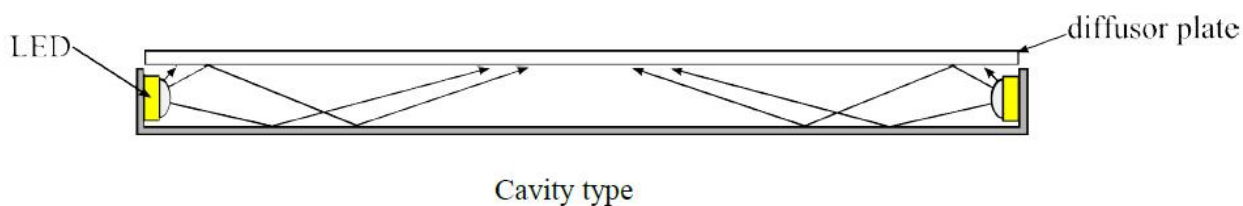


**Figura 31 Estrattore realizzato mediante superficie ruvida**

In uno schermo LCD esiste sempre uno o due layer diffusivi utilizzati per ridurre le disuniformità che sono causate dalla non uniforme distribuzione della luce dei LED e per nascondere alla vista dell’utente il pattern di dot realizzati sulla guida di luce. Queste necessità sono notevolmente ridotte nel caso di apparecchi di illuminazione per illuminazione generale, dato che che i requisiti di non uniformità sono generalmente minori, rispetto a quelli di un display LCD.

Layer prismatici possono essere posti di fronte alla superficie di uscita dell’apparecchio: la struttura prismatica nel layer, focalizza la luce lungo un asse riflettendo all’interno della guida la luce proveniente da direzioni molti differenti rispetto all’asse. Talvolta vengono combinati tra loro due film aventi prismi in direzioni ortogonali tra loro in modo tale che il flusso emesso sia concentrato all’interno della porzione desiderata di angolo solido (di norma corrispondente all’area di lavoro che si desidera illuminare).

Esistono tuttavia alcuni altri schemi per la realizzazione di apparecchi di illuminazione back lighting: la Figura 32, mostra ad esempio una soluzione definita “Cavity Type”, in cui la luce viene riflessa dalle pareti e dal fondo della camera di miscelazione che sono ricoperte di un film altamente riflettente.<sup>a</sup>

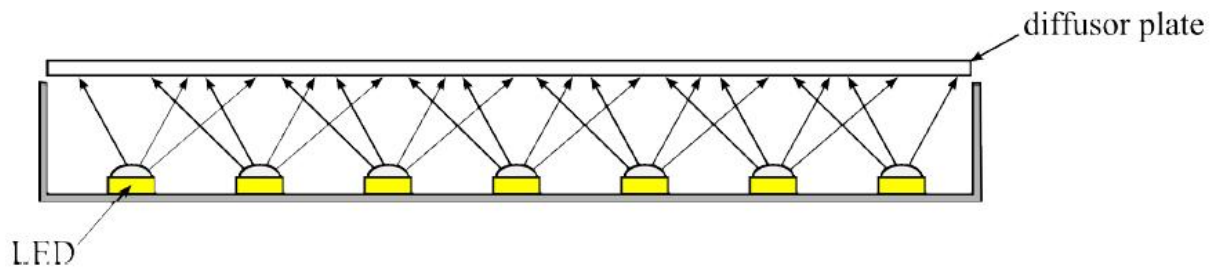


**Figura 32 Soluzione “Cavity Type”**

La parte superiore dell’apparecchio è costituita da una superficie diffondente per distribuire la luce in modo diffuso e per nascondere i LED alla vista diretta da parte degli utenti. Le caratteristiche di questa soluzione sono una potenziale riduzione delle perdite ottiche del sistema e una diminuzione di peso. Come nel caso precedente all’aumentare delle dimensioni dell’apparecchio, diminuisce l’efficienza del sistema.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Kenny Ranerup, “Prestudy: Efficient area luminaries based on brightness enhancing film and LED”, Report 09/04/2010, CIT Recycling Development AB

<sup>b</sup> Kenny Ranerup, “Prestudy: Efficient area luminaries based on brightness enhancing film and LED”, Report 09/04/2010, CIT Recycling Development AB

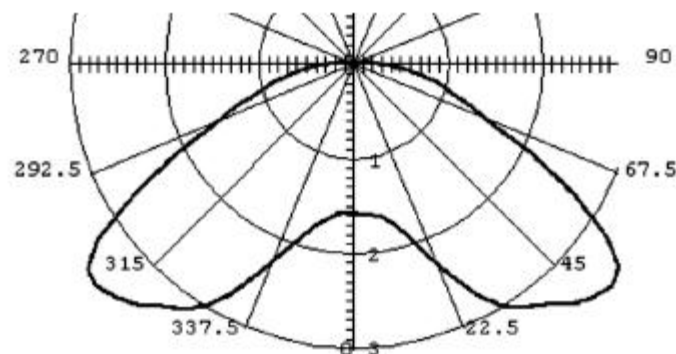


Direct-light type

**Figura 33 Soluzione “Direct Light Type”**

Una variante del caso precedente è costituita dallo schema “Direct light”, (confronta con la Figura 33), in cui i LED sono posti in file sul fondo della camera di miscelazione e la camera di miscelazione è coperta da un diffusore. In questo caso, è difficile ottenere elevati valori di uniformità, soprattutto riducendo l’altezza della camera di miscelazione. Il valore di efficienza raggiunto dal sistema è indipendente dalle dimensioni dell’apparecchio.<sup>a</sup>

Data la particolare applicazione del prodotto, vi è un notevole interesse per distribuzioni fotometriche diverse da quella lambertiana: in particolare la distribuzione batwing che presenta la massima intensità attorno a 45° rispetto alla verticale (zenith/nadir), con meno del 70% della massima intensità nella direzione di zenith/nadir.



**Figura 34 Distribuzione di tipo batwing**

Per ottenere una distribuzione fotometrica simile a quella riportata alla Figura 34, alcuni autori <sup>b</sup>hanno utilizzato due guide di luce identiche ciascuna che realizza rispettivamente l’emissione destra e sinistra rappresentate nella figura precedente. La soluzione ottica proposta è rappresentata nella Figura 35, vista in sezione: le superfici ottiche indicate con A, sono quelle attraverso cui la luce abbandona la guida, quelle di tipo B, rappresentano le superfici su cui si ha riflessione interna (100% di riflessione) alla guida. La finitura delle superfici C è tale da garantire lo scattering di tipo lambertiano con riflettanza pari al 93 % circa.

<sup>a</sup> Kenny Ranerup, “Prestudy: Efficient area luminaries based on brightness enhancing film and LED”, Report 09/04/2010, CIT Recycling Development AB

<sup>b</sup> Yimin Gu, Nadarajah Narendran, “Design and evaluation of a LED-based light fixture”, Third International conference of Solid State Lighting, Proceedings of SPIE 5187:318-329

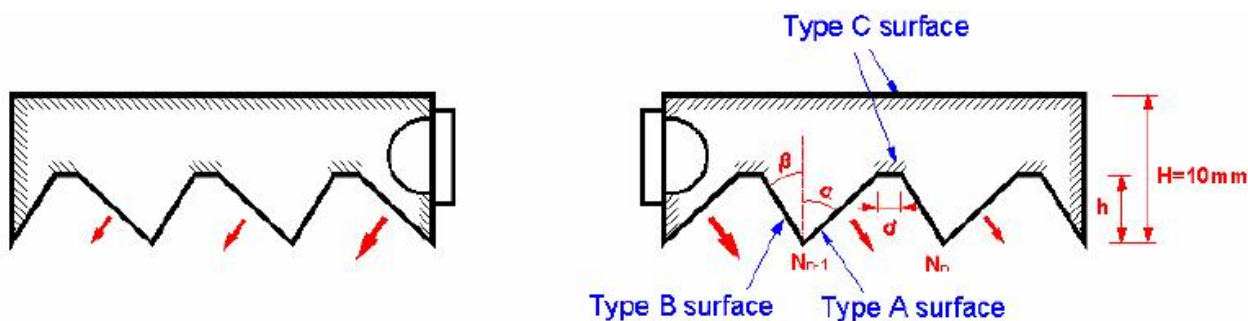


Figura 35 Sezione della soluzione proposta per la distribuzione di tipo batwing

In questo caso la progettazione si riduce alla scelta dei parametri rappresentati dai due angoli  $\alpha, \beta$  e dal passo  $d$  tra due prismi successivi al fine di ottenere una distribuzione fotometrica (nel piano di sezione), simile a quella rappresentata in Figura 34, cercando al tempo stesso di massimizzare il rendimento dell'apparecchio.

Gli stessi autori, hanno ottenuto una distribuzione di tipo lambertiano, sfruttando una guida a sezione rettangolare, in cui tutte le superfici, tranne due<sup>a</sup>, sono state rese lambertiane con riflettanza del 93%.

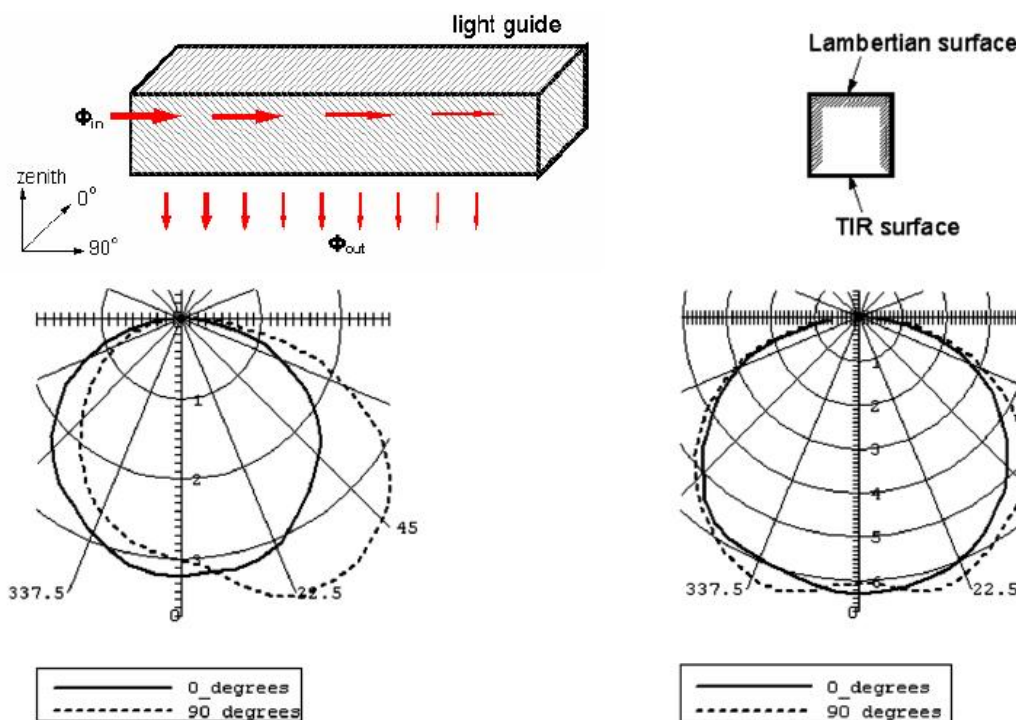


Figura 36 Sezione della guida per emissione lambertiana (in alto). In basso a sinistra il risultato della simulazione a ray-tracing mettendo i LED da un solo lato della guida, a destra il risultato con i LED da ambo i lati.<sup>b</sup>

La combinazione di elementi batwing e lambertiano, consente la realizzazione di un sistema modulare, la cui distribuzione fotometrica può essere variata, mediante l'accensione o lo spegnimento di gruppi di LED, come mostrato alla Figura 37. Il sistema realizzato consente una emissione diretta/indiretta, in cui l'emissione diretta può essere di tipo batwing o lambertiano o una combinazione delle precedenti.

<sup>a</sup> Non sono state trattate le superfici di accoppiamento LED ottica e quella di uscita del flusso luminoso. L'emissione lambertiana si ottiene ponendo i LED da entrambi i lati della guida.

<sup>b</sup> Yimin Gu, Nadarajah Narendran, "Design and evaluation of a LED-based light fixture", Third International conference of Solid State Lighting, Proceedings of SPIE 5187:318-329



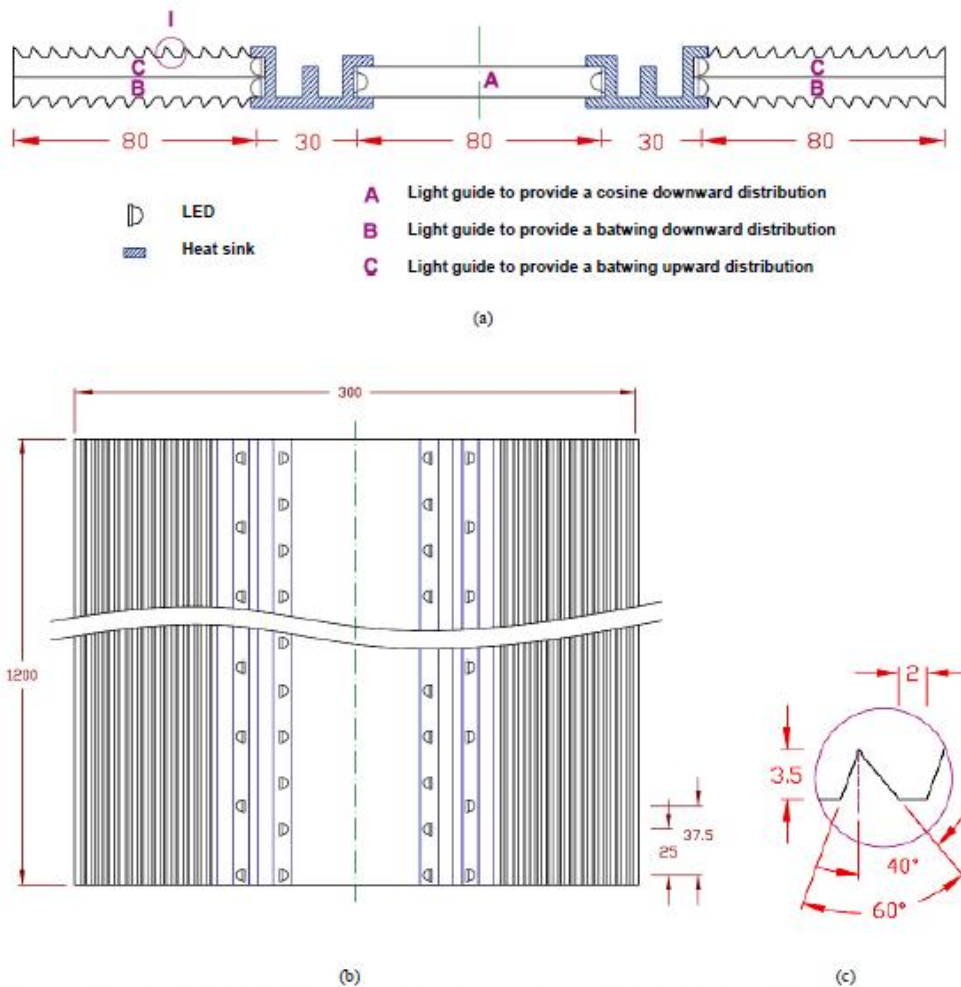


Figure (a) Cross section view and (b) top view of the light guide system; (c) final dimensions of the prisms.

**Figura 37 Vista in sezione e dall'alto del sistema modulare completo, in cui sono specificate le diverse tipologie di guida, gli ingombri di massima del sistema e i parametri geometrici, ottenuti dal processo di ottimizzazione descritto nell'articolo citato<sup>a</sup>.**

## 7.4 Pellicole Riflettenti

Sono utilizzate nella realizzazione di diversi particolari delle soluzioni ottiche presentate nel paragrafo precedente.

Ci sono molte alternative in commercio, tra cui possiamo ricordare:

- Cerflex, produttore di camere di miscelazione, basate su un materiale ceramico, ad alta riflettanza (99.2%). Questo materiale CERFLEX<sup>®</sup>TECH, coperto da brevetto internazionale, può essere prodotto in diverse forme e dimensioni a seconda delle specifiche del cliente. Le principali caratteristiche sono l'elevata resistenza alle alte temperature (fino a 1000 °C) e l'estrema stabilità lungo la vita utile del prodotto (non ingiallisce, non si corrode). La riflettanza spettrale mostra una curva molto piatta in un ampio range spettrale (380 -2000 nm), con un'emissione pressoché lambertiana della radiazione riflessa.<sup>b</sup>
- Furukawa produce un materiale a micro-celle di polietilene tereftalato (MC-PET) che è un materiale micro-schiumato con dimensioni delle celle minori di 10 μm. Consente di ottenere una risposta

<sup>a</sup> Yimin Gu, Nadarajah Narendran, "Design and evaluation of a LED-based light fixture", Third International conference of Solid State Lighting, Proceedings of SPIE 5187:318-329

<sup>b</sup> CerFlex International BV • Dwardsdijk 3 • 5705 DM Helmond • The Netherlands T +31(0)492 780 027 E info@cerflex.com Web: www.cerflex.com

spettrale piatta rispetto alle lunghezze d'onda della banda del visibile. La massima temperatura raggiungibile dal materiale è pari a 177°C, la sua riflettanza diffusa è pari al 96%<sup>a</sup>.  
 Risulta da poco disponibile un materiale, su base PC, con proprietà ottiche simili, ma che consente migliori performance di termoformatura, denominato MCPOLYCA.

\*Reflective Performance at 550nm  
 - 99% in total and 96% in diffuse

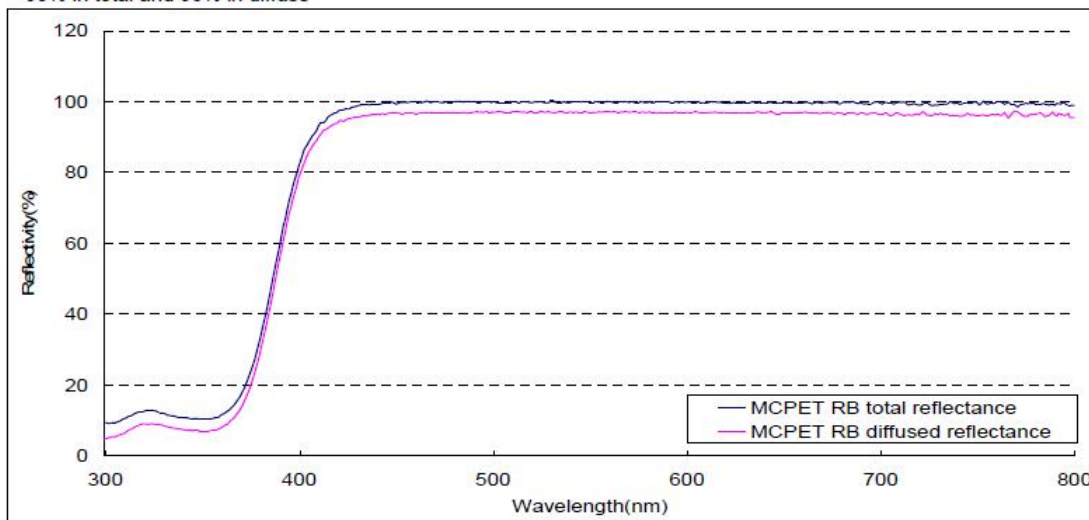


Figura 38 Riflettanza spettrale Furukawa MC-PET RB (datasheets prodotto)

- White optics :produttore di un film di polietilene ad alta densità, con fattore di riflessione di 97.4% alla lunghezza d’onda di 550 nm, con riflessione di tipo lambertiano. Anche in questo caso la curva di riflettanza spettrale presenta un andamento pressoché piatto nella banda del visibile. La temperatura di deformazione risulta pari a 124°C. Il materiale è disponibile in rotoli e fogli, può essere termoformato e presentare un lato adesivo.<sup>b</sup>

Le pellicole riflettenti rivestono un ruolo molto importante nel sistema sviluppato e descritto in seguito nella relazione per la realizzazione della camera di miscelazione che risulta un componente indispensabile per entrambe le tecnologie proposte per la generazione di luce bianca.

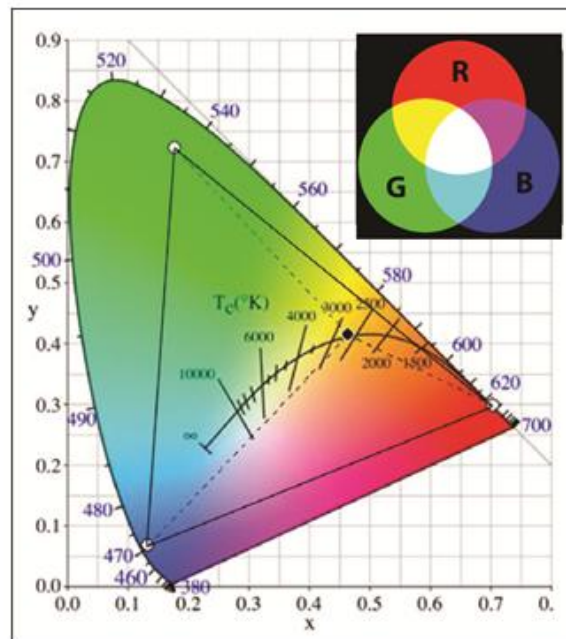
<sup>a</sup> <https://www.furukawa.co.jp/mcpet/english/lineup.htm>, accessed July 24<sup>th</sup> 2013

<sup>b</sup> <http://whiteoptics.com/products/>, accessed July 24<sup>th</sup> 2013

## 8 La generazione della luce bianca con i LED

La maggior parte delle soluzioni tecnologiche a LED utilizzano il principio della sintesi additiva del colore per generare la luce bianca. La luce bianca può essere generata attraverso il mix dei tre colori primari (rosso, verde e blu) oppure attraverso la combinazione di un primario (blu) con il suo complementare (giallo).

Con l'attuale livello di sviluppo dei LED si sono consolidati tre metodi per la generazione della luce bianca. Il primo metodo è ottenuto attraverso la combinazione di più dies (chip) di colori diversi (tipicamente rosso, verde e blu) all'interno di uno stesso package oppure realizzando cluster di LED differenti. Con l'utilizzo della soluzione multichip si ottengono migliori risultati in termini di miscelazione del colore. Il vantaggio di questa soluzione risiede nella possibilità di realizzare una infinita combinazione di colori all'interno della gamut area definita dalle coordinate cromatiche dei singoli dies, con la conseguente possibilità di realizzare una gamma di bianchi dal freddo al caldo. Per contro il suddetto metodo ha il difetto di generare una luce bianca con scarsa resa cromatica<sup>63</sup>. Per ovviare a questa criticità alcuni produttori hanno realizzato multichip di tipo RGBW (rosso, verde, blu e bianco). Un altro svantaggio di questa metodologia è legato ai costi elevati in quanto il sistema di pilotaggio elettronico è sostanzialmente più complesso. Nel caso di applicazioni che richiedano esclusivamente luce bianca questo metodo non viene utilizzato.



**Figura 39 – luce bianca ottenuta con LED RGB**

Il secondo metodo per la generazione di luce bianca prevede l'utilizzo di un LED blu in combinazione con un materiale convertitore di lunghezza d'onda (fosforo)<sup>64</sup>. In questo caso la luce blu generata dal LED eccita il fosforo (Figura 40) che la converte ri-emettendola a lunghezze d'onda maggiori (con un picco tipicamente sul giallo). Il mix di blu e giallo viene percepito dall'occhio umano come luce bianca e una attenta miscelazione di fosfori permette di ottenere temperature colore su tutta la curva Planckiana. I fosfori maggiormente utilizzati sono gli YAG:Ce (Yttrium Aluminium garnet drogati con Cerio). Rispetto al metodo RGB, il metodo a conversione di fosfori ha un notevole vantaggio legato alla necessità di pilotare un unico emettitore di luce, con notevoli semplificazioni in termini di elettronica di controllo. Anche dal punto di vista ottico il controllo è estremamente semplificato in quanto non ci sono grossi problemi di miscelazione del colore (a parte il fenomeno del cosiddetto "yellow ring"<sup>65</sup> dovuto ad una differente distribuzione nello spazio della luce blu rispetto a quella gialla). Con il metodo a conversione di fosfori è possibile raggiungere elevatissimi valori di indice di resa cromatica, anche se questa è ottenuta a scapito dell'efficienza.

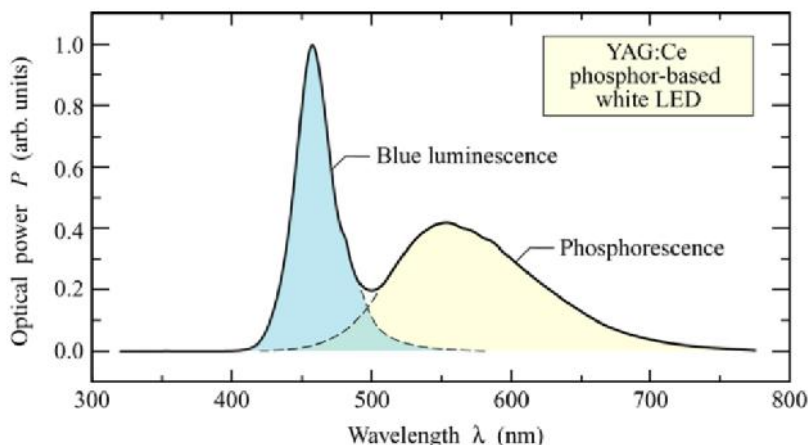


Figura 40 – Luce bianca ottenuta per conversione dei fosfori<sup>a</sup>

Un terzo metodo di recente sviluppo utilizza un approccio intermedio tra i due precedenti. La luce bianca viene ottenuta attraverso il mix di due tipi di sorgenti: LED con emissione spettrale spostata nella regione verde (EQ-White nel caso Osram) e LED rossi o ambra (Figura 41).

Il LED “bianco-verde” viene realizzato utilizzando un LED blu e dei fosfori verdi (le perdite di efficienza nella conversione sono molto ridotte in quanto lo spostamento delle lunghezze d’onda è minore rispetto ai fosfori gialli o rossi). L’utilizzo di un LED che emette direttamente e non per conversione nella regione dei rossi comporta un notevole vantaggio in termini di efficienza e di resa cromatica, soprattutto a basse temperature colore.

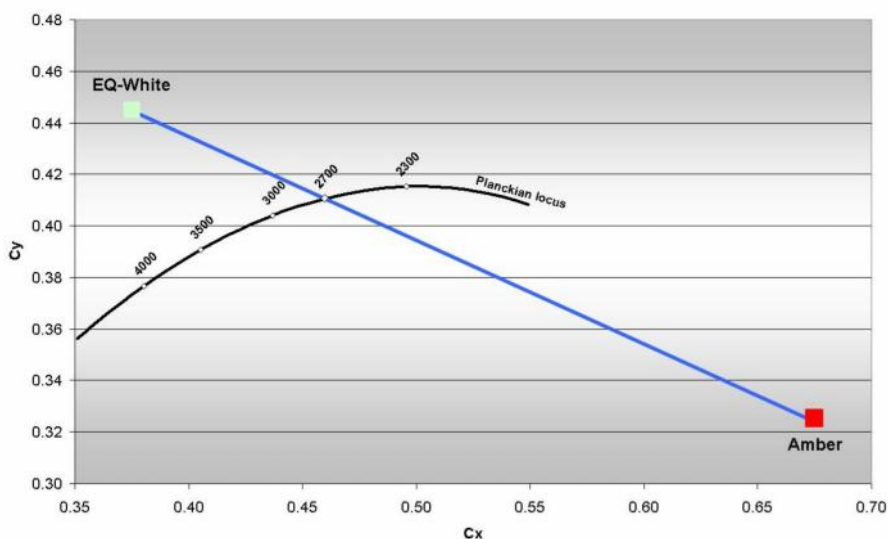


Figura 41 – Color mixing per ottenere luce bianca da un LED bianco-verde e uno rosso

Questo approccio è in grado di produrre luce bianca con una maggiore efficienza quantificabile attorno al 30%. Per contro l’utilizzo di due tecnologie LED differenti (InGaN e AlInGaP) per la generazione del blu e del rosso comportano una complicazione a livello di controllo elettronico.

<sup>a</sup> Schubert, E. Fred (2003). "1". Light-Emitting Diodes. Cambridge University Press. ISBN 0-8194-3956-8.

## 8.1 Luce bianca per conversione di fosfori

La metodologia ad oggi maggiormente utilizzata per la generazione della luce bianca è quella con conversione dei fosfori. Il fosforo pertanto diventa uno dei materiali chiave nell'illuminazione allo stato solido così come lo è stato per le lampade fluorescenti. Come abbiamo visto in precedenza il fosforo assorbe la luce blu (ma anche UV) e la converte in luce con lunghezze d'onda maggiori. I fosfori pertanto giocano un ruolo importante nella definizione delle prestazioni dei LED bianchi quali l'efficienza luminosa, la resa dei colori, la temperatura colore, la vita utile e la stabilità del colore.

I fosfori sono materiali studiati già da tantissimo tempo e per svariate applicazioni (CRT, lampade fluorescenti, ecc.) ma la maggior parte di questi fosfori tradizionali non sono adeguati per l'illuminazione a stato solido a causa della loro bassa efficienza di conversione partendo dalla luce blu dei LED. Inoltre i fosfori tradizionali presentano uno smorzamento (quenching) causato dalle alte temperature dei LED (fino a 150°C). Questi sono i motivi principali che hanno spinto le ricerche verso nuovi fosfori utilizzabili nell'illuminazione allo stato solido. Tali fosfori devono avere le seguenti caratteristiche:

- Forte capacità di assorbimento dello spettro emesso dai LED blu.
- Alta efficienza di conversione alle lunghezze d'onda desiderate.
- Bassa dipendenza delle caratteristiche di emissione in funzione della temperatura.

Ad oggi numerosissimi tipi di fosfori sono stati studiati per l'utilizzo con i LED. Tra questi ci sono silicati, alluminati, nitruri e solfuri. Tra le principali caratteristiche è opportuno citare la stabilità termica e le caratteristiche di emissione spettrale (Tabella 1).

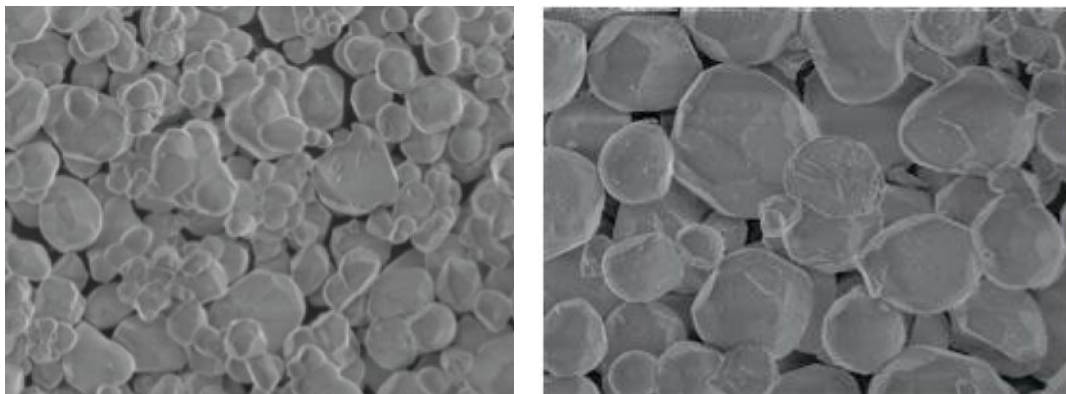


Figura 42 – Fosfori YAG

Tabella 1 Proprietà delle principali tipologie di fosfori studiati per l'utilizzo con i LED

	Stabilità in temperatura	Spettro
<b>Silicati</b>	Bassa	Stretto
<b>GAL (green aluminate)</b>	Alta	Ampio
<b>YAG (Yttrium aluminium garnet)</b>	Alta	Ampio
<b>Nitruri</b>	Alta	Stretto
<b>Solfuri</b>	Variabile	Stretto

In Figura 43 sono raffigurate le tipologie di Fosfori per LED di Intematix (uno dei maggiori produttori di fosfori). L'offerta è estremamente ampia su tutte le lunghezze d'onda dai verdi ai rossi.

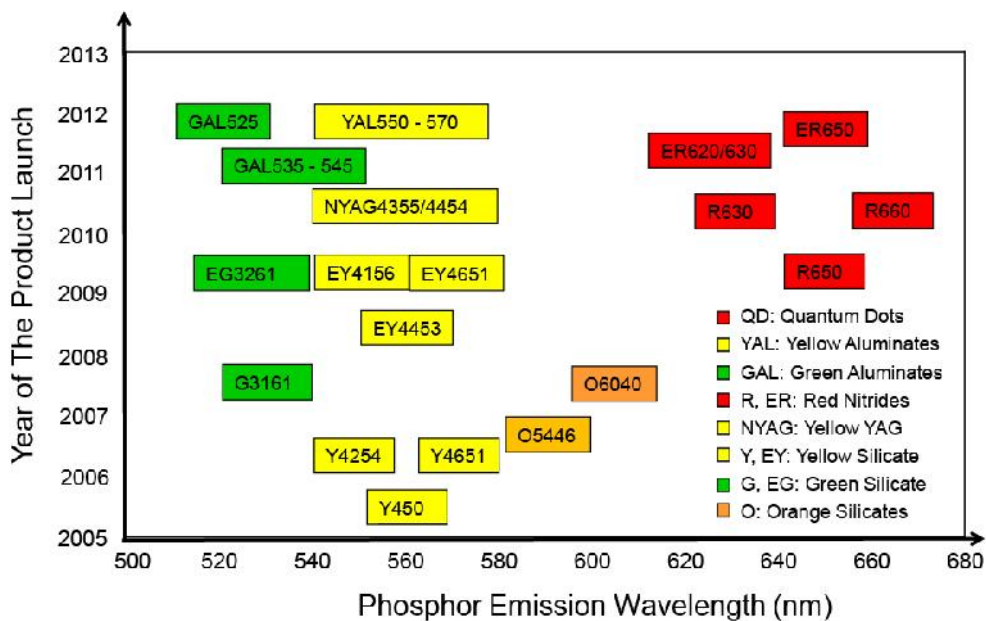


Figura 43 – Fosfori per LED Intematix

Il principio fisico di funzionamento dei fosfori è denominato luminescenza, un fenomeno che consiste nell'emissione di fotoni di luce visibile da parte di materiali eccitati da cause diverse dall'aumento di temperatura. La luminescenza nasce dalla proprietà di alcuni materiali di assorbire quantità discrete di energia, successivamente restituita sotto forma di fotoni. Il fosforo non emette luce se non assorbendo abbastanza fotoni con una specifica frequenza. Generalmente i fosfori più efficienti e stabili sono basati su un materiale inorganico che funge da "host" e che viene drogato da ioni attivatori. Nel corso degli ultimi anni gli attivatori  $\text{Eu}^{2+}$  e  $\text{Ce}^{3+}$  sono stati quelli più utilizzati. Lo spettro di eccitazione di un fosforo tipicamente usato per White LED ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ ) è rappresentato in Figura 44.

Come si vede ci sono due ampie bande di eccitazione centrate sui 340 e 455 nm. Tale spettro è dovuto in gran parte al dopante (Ce) in quanto il solo YAG non drogato presenta un solo picco di assorbimento a circa 190 nm.

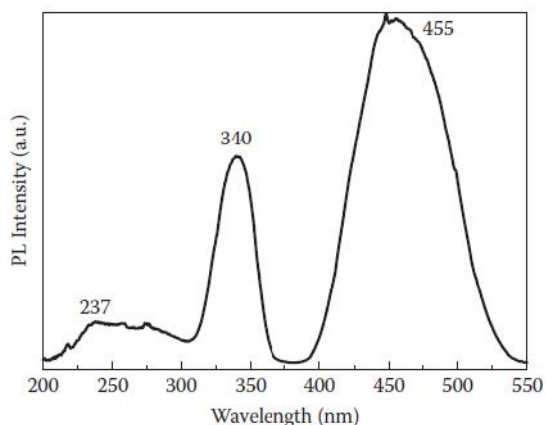
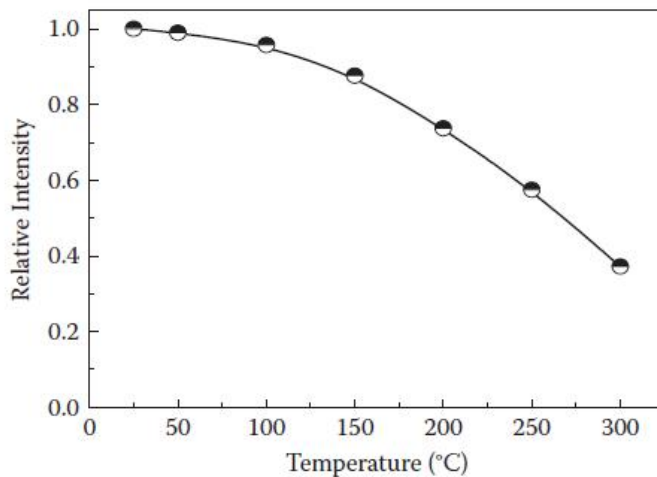


Figura 44 - Spettro di eccitazione di un fosforo  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$

Il picco di assorbimento estremamente elevato a 455 nm si combina molto bene con l'emissione dei LED a base GaN, conferendo allo  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  ottime caratteristiche di conversione, in termini di efficienza, in luce visibile a lunghezze d'onda maggiori.

Ciò che occorre tenere sicuramente in considerazione è l'efficienza di emissione in funzione della temperatura. In Figura 45 è rappresentato l'andamento del flusso relativo di un fosforo  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  in funzione della temperatura. Alle temperature tipiche di funzionamento dei LED si ha una riduzione di circa

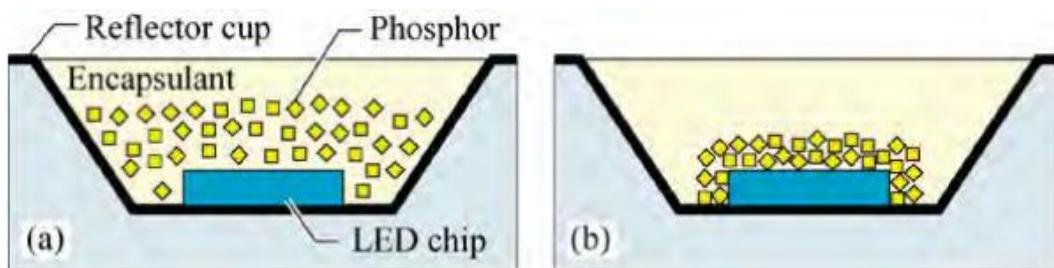
il 10-15%. Mantenere bassa la temperatura del fosforo è quindi un metodo per aumentare l'efficienza dell'intero sistema.



**Figura 45 - Comportamento dei fosfori YAG:Ce<sup>3+</sup> in funzione della temperatura.**

## 8.2 Fosfori remoti

Nei LED dicromatici i fosfori possono essere disposti a diretto contatto con il die (conformal phosphor distribution) oppure distribuiti uniformemente nel materiale incapsulante contenuto nel riflettore primario (phosphor-in-cup). Queste due tipologie di deposizione limitano notevolmente l'efficienza dei LED per il seguente motivo: a causa della ri-emissione isotropica dei fotoni, una gran parte della luce emessa dai fosfori tornerà sul die dove verrà riassorbita. Questa problematica è maggiormente evidente nella configurazione "conformal phosphor" a causa del diretto contatto dei fosfori con il die<sup>66</sup>.



**Figura 46 - (a) Distribuzione "conformal". (b) Distribuzione "phosphor-in-cup"**

Se i fosfori vengono posizionati ad una distanza sufficientemente elevata dal LED chip, configurazione cosiddetta a *fosfori remoti*, la probabilità di un raggio di luce emesso dal fosforo di essere riassorbito si riduce notevolmente; inoltre la configurazione a fosfori remoti riduce la temperatura operativa dei fosfori incrementando la vita, l'efficienza e l'affidabilità dei LED bianchi.

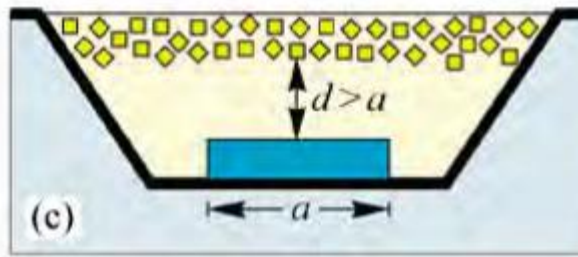


Figura 47 – Distribuzione remota dei fosfori

Nel 2005 al Lighting Research Center (LRC) del Rensselaer Polytechnic Institute (NY) è stata messa a punto una tecnica basata sui fosfori remoti denominata Scattered Photon Extraction (SPE) al fine di incrementare in modo significativo l'efficienza di estrazione dei LED<sup>67</sup>. La tecnica si basa sullo spostamento dei fosfori lontano dal die e sulla progettazione di una camera di miscelazione in grado di estrarre una quantità significativa di luce proveniente dal "back scattering". Il concetto dei fosfori remoti era già stato preso in considerazione precedentemente (Chen – 1999, Noguchi 2004) ma l'SPE è il primo metodo in grado di dimostrare l'efficienza di estrazione della luce "back scattered" con risultati notevoli in termini di incremento dell'efficienza di estrazione.

Nella prima fase di definizione dell'SPE sono stati rilevati i valori di luce trasmessa e riflessa da parte dei fosfori eccitati da luce blu. In Figura 48 è rappresentato il set-up dell'esperimento condotto al Lighting Research Center. Un disco di vetro con YAG:Ce a differenti concentrazioni (da 2 mg/cm<sup>2</sup> a 8 mg/cm<sup>2</sup>) è stato posizionato tra due sfere integratrici; un LED blu è stato posizionato in una delle due sfere a 2,5 cm dal disco di vetro ed è stata misurata l'energia radiante nelle due sfere.

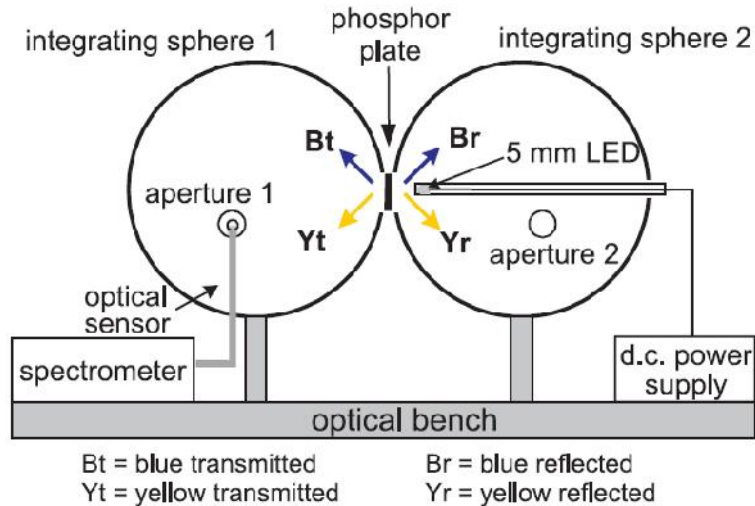


Figura 48 – Set-up sperimentale usato per misurare la luce trasmessa e riflessa dal fosforo.<sup>a</sup>

L'energia totale radiante nei LED bianchi può essere descritta dalla formula:

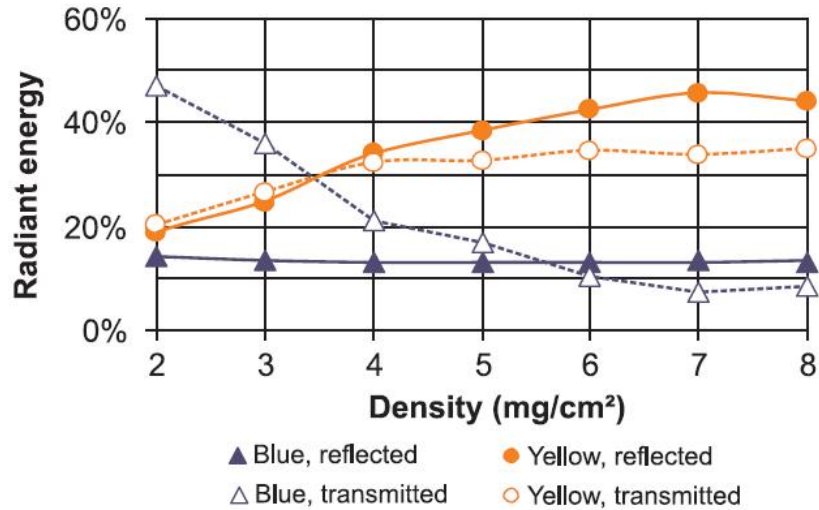
$$E_{tot} = (E_{bt} + E_{yt}) + \eta (E_{br} + E_{yr})$$

Dove  $E_{bt}$ ,  $E_{yt}$ ,  $E_{br}$ ,  $E_{yr}$  sono le energie trasmesse e riflesse dalla radiazione blu e gialla e  $\eta$  è l'efficienza di estrazione dei fotoni "back scattered". Nei LED a fosfori prossimi una gran parte della luce riflessa viene

<sup>a</sup> Specificata fonte non valida.

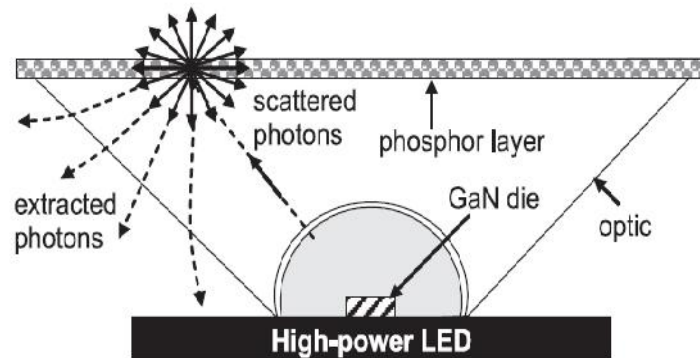


assorbita con un conseguente basso valore di  $\eta$ . Nel caso di una configurazione a fosfori remoti invece il valore  $\eta$  aumenta in relazione al fatto che solo una parte di fotoni viene riassorbita dal die. Nella Figura 49 viene evidenziato l'andamento della energia radiante blu e gialla (sia riflessa che trasmessa) in funzione della densità dei fosfori espressa in  $\text{mg}/\text{cm}^2$ .



**Figura 49 – Energia radiante riflessa e trasmessa in funzione della densità dei fosfori.**

Sulla base delle considerazioni fatte è stato proposto un metodo per estrarre la maggior parte possibile di luce riflessa dal fosforo. In Figura 50 è rappresentato lo schema di funzionamento. Importante notare che la geometria del sistema ha un ruolo significativo ai fini del miglioramento dell'estrazione.



**Figura 50 – Schema SPE**

In seguito ad alcune verifiche effettuate e comparazioni con LED tradizionali i ricercatori dell'LRC sono arrivati a dimostrare un aumento di efficienza del sistema attorno al 60% nel caso dei fosfori remoti.

## 9 Benchmarking dei prodotti a fosfori remoti disponibili sul mercato

La valutazione di un sistema a fosfori remoti deve essere messa in relazione in termini di prestazioni (flusso emesso, resa cromatica, grandezze parametri fotometrici ecc.) con equivalenti dispositivi a LED tradizionali. E' pertanto necessario individuare prodotti attualmente disponibili sul mercato che siano basati sulle due differenti filosofie progettuali. Questo permetterà di definire una serie di parametri di confronto e valutare quali siano i possibili vantaggi da un punto di vista prestazionale di una soluzione a fosfori remoti rispetto ad una soluzione tradizionale.

Attualmente il mercato presenta due produttori principali di light engines basati sui fosfori remoti: Philips e Xicato. Esistono anche altri produttori, tra cui LG e Vexica (vedi Figura 51), ma i dati dei prodotti sono in alcuni casi di difficile reperibilità, motivo per cui verranno presi in considerazione solo i prodotti di Philips e Xicato.



Figura 51 – LUMERA-50-RP - Vexica

### 9.1 Philips Fortimo LED DLM Gen 3+ system

Philips è stata tra i primi produttori a presentare un light engine basato su fosfori remoti. Una delle prime versioni, il modulo DLM, è arrivato ormai alla terza generazione. Il Light Engine è costituito da una struttura base in alluminio su cui è fissata una LED board (PCB con i LED), una camera di miscelazione e un diffusore a fosfori remoti.



Figura 52 – Philips Fortimo DLM Gen 3

Ecco alcune delle principali caratteristiche della attuale versione:

Flussi luminosi: da 1100 a 3000 lm  
 CRI Ra: > 80  
 Temperatura colore: 3000K -3500K - 4000K  
 Tolleranza colore: 3 SDCM (Standard Deviation of Color Matching)  
 Potenze: da 11 a 39 W nominali

Nelle specifiche tecniche del prodotto vengono indicati anche i valori di efficienza sia del singolo modulo che del sistema (modulo più alimentatore). Si va da 103 lm/W a 72 lm/W nel caso del modulo e da 87 lm/W a 63 lm/W nel caso del sistema, anche se non viene specificato in maniera esplicita a quale temperatura si riferisce la misura.

With Philips Xitanium 25 W driver family	Light output	Module Power	Module efficacy	System Power	System efficiency
fixed light output	lm	W	lm/W	W	lm/W
Fortimo LED DLM 1100 12W/830 Gen3+	1100	12	94	14	79
Fortimo LED DLM 1100 11W/840 Gen3+	1100	11	103	13	87

With Xitanium 50 W drivers	Light output	Module Power	Module efficacy	System Power	System efficiency
fixed light output	lm	W	lm/W	W	lm/W
Fortimo LED DLM 2000 23W/830 Gen3+	2000	23	87	26	74
Fortimo LED DLM 2000 21W/840 Gen3+	2000	21	95	24	81

Fortimo 1100-3000 fixed output driver	Light output	Module Power	Module efficacy	System Power	System efficiency
Xitanium 45 W fixed output driver	lm	W	lm/W	W	lm/W
Fortimo LED DLM 3000 39/830 Gen3+	3000	39	72	44	63
Fortimo LED DLM 3000 35/840 Gen3+	3000	35	79	40	69

Figura 53 – Flussi e potenze dei moduli Fortimo DLM (Fonte: Philips)

Esiste una versione differente del Fortimo DLM, il TDLM. E' una versione dotata di un attacco a baionetta che consente un aggancio al dissipatore tramite un holder .

Rispetto alla versione DLM i flussi luminosi sono inferiori, così come le vite attese del prodotto.



Figura 54 – Philips Fortimo TDLM

### 9.2 PHILIPS Fortimo LED DLM Food

Una versione specificamente studiata per il settore alimentare presenta la caratteristica di avere alcuni LED rossi oltre ai classici LED blu (Fortimo LED DLM Food).



Figura 55 – Philips Fortimo DLM Food

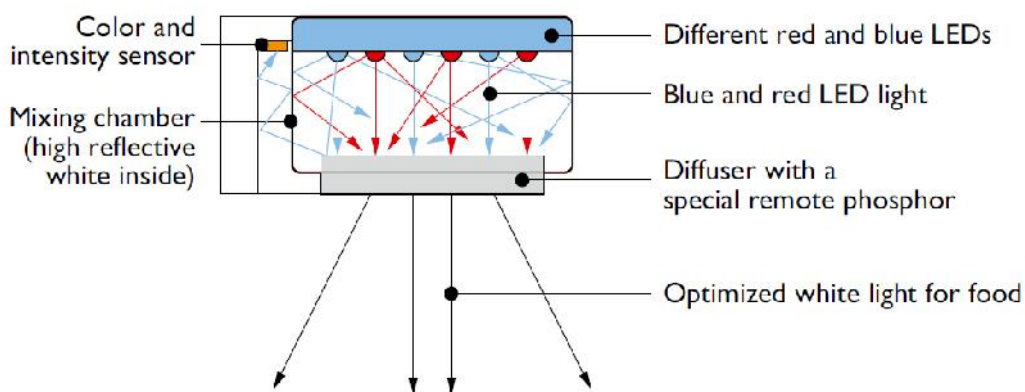


Figura 56 - Philips Fortimo DLM Food – Schema interno

La presenza di LED rossi (basati su tecnologia AlInGaP) richiede un controllo elettronico più sofisticato al fine di avere uno spettro di emissione quanto più possibile costante nel tempo. Nel caso del DLM Food i

flussi luminosi sono inferiori alla versione DLM normale, così come le efficienze in termini di lm/W e i tempi di vita.

Flussi luminosi: da 1800 a 2700 lm  
 CRI Ra: > 75  
 Temperatura colore: 3000K o 4000K  
 Tolleranza colore: 6 SDCM (Standard Deviation of Color Matching)  
 Potenze: da 36 a 43 W  
 Efficienza sistema: da 53 a 63 lm/W

### 9.3 PHILIPS Fortimo LED linear light module (LLM)

Recentemente è stata introdotta una versione lineare del fortimo (LLM) per un utilizzo in apparecchi di illuminazione in esterni. Rispetto alla versione DLM è stato ridotto il valore di indice di resa cromatica ed aumentati i flussi.

Flussi luminosi: da 1100 a 4500 lm  
 CRI Ra: > 70  
 Temperatura colore: 3000 o 4000K  
 Tolleranza colore: 7 SDCM (Standard Deviation of Color Matching)  
 Potenze: da 11 a 53 W  
 Efficienza sistema: da 85 a 100 lm/w



Figura 57 – Philips Fortimo LED LLM

### 9.4 XICATO

Xicato è stata una delle prime aziende a fornire un light engine basato sul principio dei fosfori remoti. Caratteristica presentata sempre come peculiare è stata l'elevata qualità di colore, con indici di resa cromatica che nella famiglia "Artist" raggiunge un valore di  $R_a=98$ .

	Ra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15
Standard XSM	81	80	85	89	81	78	80	86	66	16	64	79	58	81	93	75
Artist Series XSM	98	98	99	98	98	98	97	98	98	96	99	98	88	98	98	98
Typical IR coated Halogen Dichroic	98	98	99	99	99	98	98	99	97	92	97	98	97	98	99	97
Typical Compact Metal Halide	82	90	94	69	82	81	81	87	71	27	59	62	55	93	78	88
Typical Compact Fluorescent	87	91	93	86	91	89	90	88	70	17	76	91	81	93	92	81

Figura 58 Indici di resa cromatica dei moduli Xicato.

Esattamente come per Philips, Xicato offre due famiglie di prodotti: una lineare ed una rotonda. I flussi luminosi vanno dai 400 lm ai 2000 lm nel caso dell'XSM (rotondo) e dai 3000 ai 4000 per l'XLM (versione lineare).

Famiglia di moduli	CRI (Ra)	Corrente (mA)	Tensione diretta			Flusso lum. a 70° C (lm)	Potenza (W)	Efficacia (lm/W)	Temp. colore (K)			
			Min	Tip	Max				2700	3000	3500	4000
XSM 400 lm	≥80	700	8,2	8,2	9,9	400	6	70	•	•		•
		500	7,9	8,1	9,6	300	4	74	•	•		•
		350	7,8	7,9	9,4	220	3	80	•	•		•
XSM 700 lm		1050	8,4	9,2	10,1	700	10	72	•	•		•
		700	8,2	8,8	9,9	500	6	81	•	•		•
		500	7,9	8,6	9,6	380	4	88	•	•		•
XSM 1000 lm		350	7,8	8,4	9,4	280	3	95	•	•		•
		1050	10,5	12,4	13,5	1000	13	77	•	•	•	•
		700	10,1	11,9	13,1	720	8	87	•	•	•	•
XSM 1300 lm		500	9,8	11,6	12,7	540	6	93	•	•	•	•
		350	9,6	11,4	12,5	380	4	96	•	•	•	•
		1050	13,1	16,9	20,0	1300	18	73	•	•	•	•
XSM 2000 lm	700	12,7	16,2	19,2	930	11	82	•	•	•	•	
	500	12,3	15,8	18,7	700	8	89	•	•	•	•	
	350	12,1	15,4	18,3	500	5	92	•	•	•	•	
XSM 3000 lm	1050	23,8	27,4	30,0	2000	29	70	•	•	•	•	
	700	23,0	26,5	29,4	1420	18	77	•	•	•	•	
	500	22,4	25,8	28,6	1070	13	83	•	•	•	•	
XSM 700 lm	350	21,9	25,3	28,0	780	9	88	•	•	•	•	
	1050	37,3	42,9	46,8	3000	45	67	•	•	•	•	
	700	36,1	41,4	45,3	2220	29	77	•	•	•	•	
XSM 1000 lm	500	35,3	40,4	44,0	1660	20	82	•	•	•	•	
	350	34,7	39,5	43,0	1210	14	88	•	•	•	•	
	700	15,3	19,2	22,6	700	13	52	•	•		•	
XSM 1300 lm	500	14,8	18,8	22,0	550	9	59	•	•		•	
	350	14,5	19,3	21,5	400	7	62	•	•		•	
	1050	16,0	20,5	23,4	1000	21	46	•	•	•	•	
XSM 1000 lm	700	15,3	19,2	22,6	700	13	52	•	•	•	•	
	500	14,8	18,8	22,0	550	9	59	•	•	•	•	
	350	14,5	18,5	21,5	400	6	62	•	•	•	•	
XSM 1300 lm	1050	23,9	26,4	30,0	1300	28	47	•	•	•	•	
	700	23,1	25,4	29,0	930	18	52	•	•	•	•	
	500	22,3	24,7	28,2	700	12	57	•	•	•	•	
		350	21,8	24,2	27,6	500	9	59	•	•	•	•

Figura 59 – Scheda tecnica moduli Xicato XSM

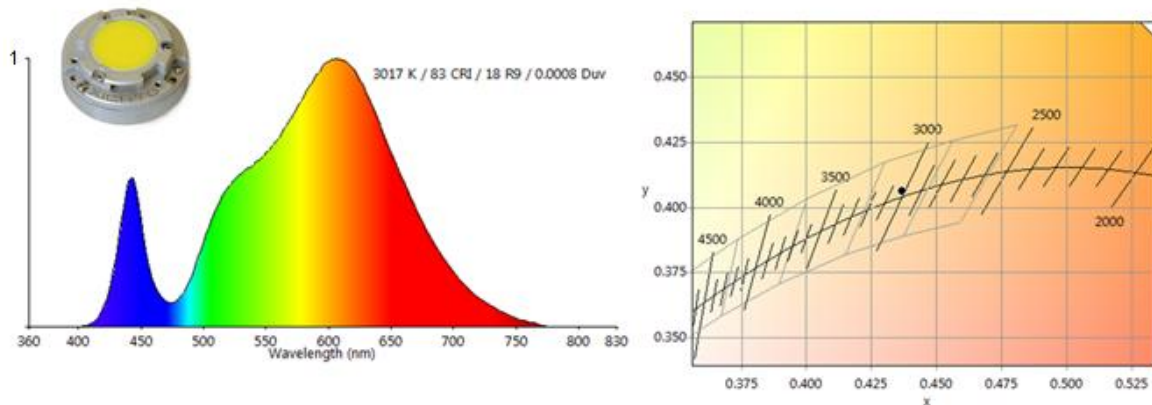
Famiglia di moduli	CRI (Ra)	Corrente (mA)	Tensione diretta			Flusso lum. a 70° C (lm)	Potenza (W)	Efficacia (lm/W)	Temp. colore (K)			
			Min	Tip	Max				2700	3000	3500	4000
XLM 3000 lm	≥80	1050	37,4	39,4	44,4	3000	41	73		•	•	•
		700	36,1	37,9	42,8	2160	26	81		•	•	•
		500	34,9	36,8	41,6	1665	18	90		•	•	•
		350	34,1	35,9	40,7	1170	13	93		•	•	•
XLM 4000 lm		1050	53,6	56,3	61,1	4000	59	68		•	•	•
		700	51,7	54,1	58,8	2880	38	76		•	•	•
		500	50,1	52,5	57,1	2145	26	82		•	•	•
XLM 3000 lm		350	48,8	51,3	55,8	1550	18	86		•	•	•
		1050	53,6	57,0	62,1	3000	60	50		•	•	•
		700	51,7	55,1	59,9	2160	39	56		•	•	•
		500	50,1	53,5	58,1	1665	27	62		•	•	•
			350	48,8	52,3	56,8	1170	18	64		•	•

Figura 60 Scheda tecnica Xicato moduli XLM

Le efficienze dei prodotti Xicato Artist sono inferiori se confrontati con alcuni prodotti Philips, ma occorre tenere in considerazione il fatto che le rese cromatiche sono significativamente superiori.

Flussi luminosi: da 400 a 4000 lm  
 CRI Ra: > 80 | >95 nella serie Artist  
 Temperatura colore: 2700 o 4000K  
 Potenze: da 3 a 60 W  
 Efficienza sistema: da 55 a 70 lm/W

La distribuzione spettrale del modulo XMS 2000 lm (3000K) è stata misurata in laboratorio e i risultati sono riportati alla Figura 61: dall'esame dei risultati si osserva che il modulo produce un flusso luminoso con temperatura di colore prossima a 3000K e la cui cromaticità dista molto poco (Duv=0.0008) dal luogo Planckiano (Figura 61).



**Figura 61 A sinistra distribuzione spettrale del modulo Xicato XMS da 2000 lm. A destra cromaticità del modulo Xicato nello spazio colore CIE(x,y) 1931**

Il valore dell'indice di resa cromatica Ra è pari a 83, con un valore non molto elevato per l'indice speciale  $R_9=18$ , relativo al campione di rosso profondo, tuttavia il valore del LER raggiunge i 323 lm/W. L'indice di resa cromatica CQS Qa è pari a 84, dove il valore non molto elevato si spiega osservando le distorsioni introdotte per i campioni  $Q_{13}, Q_{14}, Q_{15}$ . Per quanto riguarda la saturazione, si osserva che questa sorgente esalta la saturazione dei gialli e degli arancioni (anche se con distorsione della tinta, come nel campione  $Q_3$ ), ma tende a rendere i colori meno saturi nella zona del rosso (campioni  $Q_1$  e  $Q_2$ ). Per i dettagli, si faccia riferimento alla Figura 62.

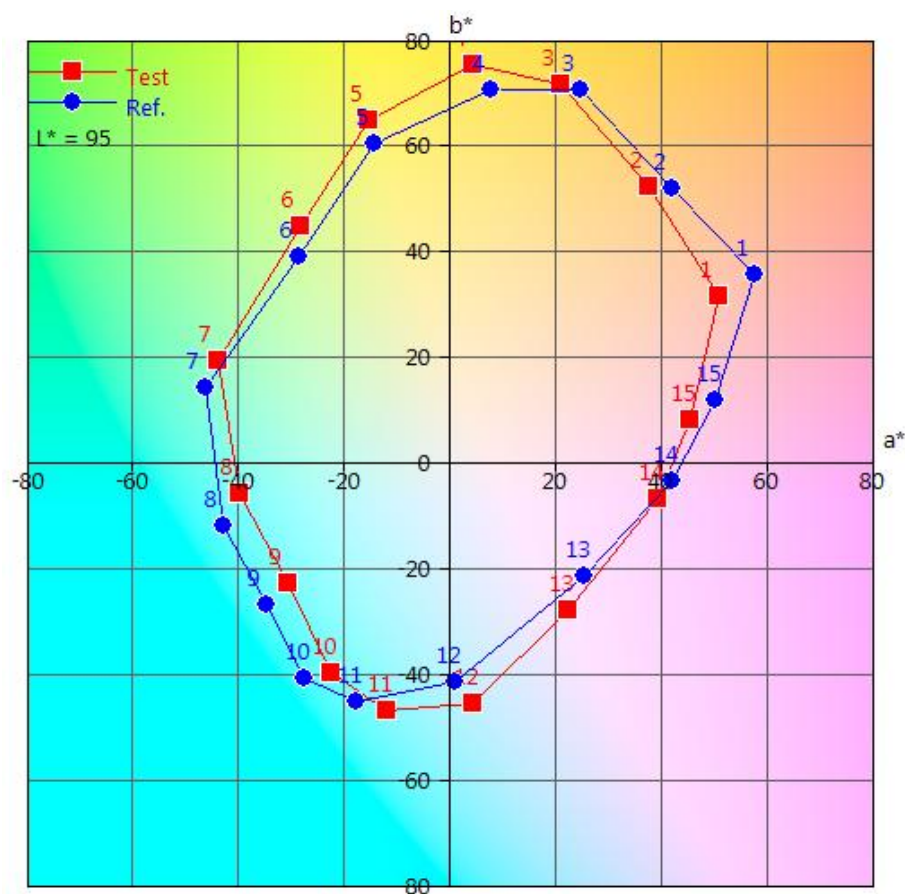


Figura 62 Gamut area nello spazio CIE Lab a fosfori remoti Xicato 3000K Ra>80

L'andamento degli indici parziali  $Q_i$  è riportato con dettaglio alla Figura 63.

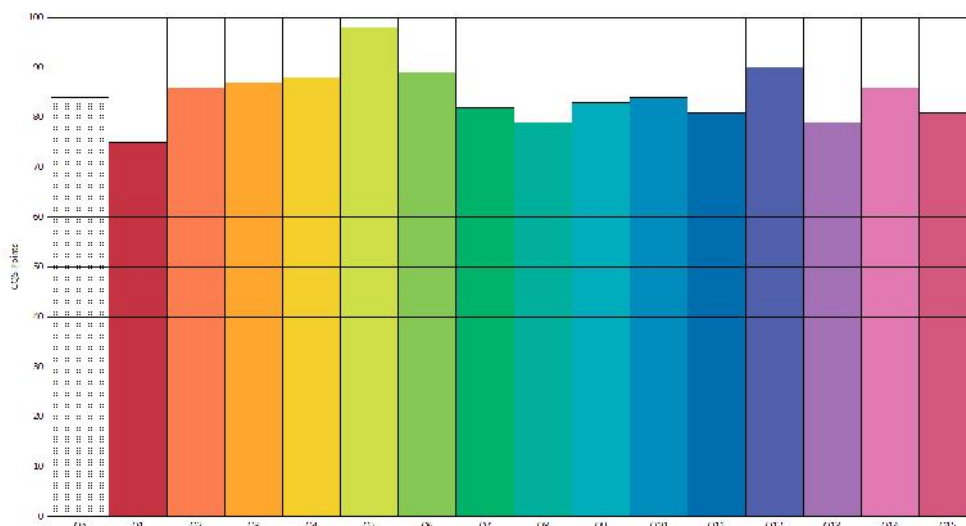


Figura 63 Indici parziali  $Q_i$  per la sorgente a fosfori remoti Xicato 3000K Ra>80

## 10 Osservazioni sui prodotti selezionati

I parametri significativi che caratterizzano i prodotti analizzati sono i seguenti:

Flussi luminosi: da 400 a 4500 lm  
 CRI Ra: da 70 a 95



Temperatura colore: 2700 o 4000K  
Potenze: da 3 a 60 W  
Efficienza sistema: da 55 a 100 lm/W

Sulla base di tali parametri è possibile individuare una serie di prodotti realizzati in tecnologia LED a fosfori prossimali in modo da poter effettuare delle comparazioni e verificare i vantaggi ipotizzati per i prodotti a fosfori remoti. Il dato che occorre tenere in considerazione è soprattutto quello dei flussi tipici dei prodotti a fosfori remoti presenti sul mercato: flussi consistenti (fino a quasi 5000 lm) che possono essere ottenuti solo con l'utilizzo di array di LED. Gli array possono essere realizzati all'interno dello stesso packaging (soluzione Chip On Board, COB) oppure combinando singoli LED di potenza in quelli che vengono definiti "LED Light Engines" (LLE). In base a queste considerazioni verrà pertanto fatta una analisi dello stato dell'arte della tecnologia per quanto riguarda le seguenti famiglie di prodotti:

- LED Array COB
- Moduli LED o LLE (LED light engine)

## 11 Chip On Board (COB)

I LED array non direzionali o COB hanno subito una profonda trasformazione nel corso degli ultimi due anni soprattutto a causa della richiesta dei produttori di apparecchi di illuminazione di una maggiore semplificazione in fase di progettazione e assemblaggio e della possibilità di avere flussi luminosi per singola sorgente LED confrontabili con le sorgenti tradizionali. I produttori che tradizionalmente avevano iniziato questo percorso (prima Citizen e poi Sharp e Bridgelux) sono stati seguiti da tutti i principali leader di mercato: Cree, Lumileds, Osram, Seoul. Ad oggi i COB sono tra le sorgenti LED più utilizzate dai produttori di apparecchi di illuminazione, soprattutto in alcuni ambiti applicativi.

Da un punto di vista tecnologico esistono differenze tra le varie famiglie di prodotti presenti sul mercato: le più evidenti sono legate al materiale che costituisce la board (alluminio o ceramica), alle dimensioni dei dies utilizzati e alla tipologia del loro collegamento.

## 12 Moduli LED - LED LIGHT ENGINE

Altra famiglia di prodotti confrontabili con le soluzioni a fosfori remoti sono i moduli LED o Light Engine Modules (LLE). Alcuni di questi moduli sono dotati di tecnologia a fosfori remoti (vedi alcuni Fortimo di Philips). L'idea che sta alla base del Light Engine è quella di fornire ai produttori una sorgente di luce più facilmente integrabile negli apparecchi, in cui oltre ai LED siano integrati un circuito stampato, un sistema di aggancio, eventuali connettori o ottiche secondarie. Dal punto di vista terminologico c'è ancora molta confusione in quanto non è del tutto definita la distinzione tra modulo e LED light engine.

A livello normativo una prima sintesi terminologica è stata compiuta nell'addendum A della RP-16-05 (Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering - IESNA).

Per i nostri scopi considereremo valida la seguente definizione di modulo LED:

**modulo LED:** *Unità fornita come sorgente luminosa. In aggiunta a uno o più LED, essa può contenere componenti aggiuntivi quali, per esempio, ottici, meccanici, elettrici e elettronici ma non l'unità di alimentazione.*

A parte questioni terminologiche, nell'ambito di questa ricerca per moduli LED si intendono tutti quei sistemi realizzati come sorgenti di luce e che integrano LED (di differenti tipologie) in un unico dispositivo che incorpora altri componenti per agganci meccanici e connessioni elettriche. In quest'ottica si inserisce il consorzio Zhaga che sta portando alla definizione di LLE standardizzati ed intercambiabili. Il Consorzio Zhaga usa il termine "LED Light Engine" per designare la combinazione di un alimentatore elettronico e di

uno o più moduli LED, secondo quanto definito nelle specifiche Zhaga. Sempre secondo Zhaga invece un modulo LED è un'unità fornita come sorgente luminosa: oltre a uno o più LED, può contenere ulteriori componenti ottici, meccanici, elettrici ed elettronici (alimentatore escluso).



Figura 64 – Esempi di LLE Zhaga

### 12.1 CREE

CREE, uno dei principali produttori di LED, ha recentemente iniziato a fornire anche moduli LED. La scelta di CREE è stata quella di fornire soluzioni proprietarie e di non seguire per ora lo standard Zhaga. Tra i moduli più interessanti ci sono quelli della serie LM (Figura 65).



Figura 65 Moduli CREE serie LM

I moduli differiscono per flussi luminosi emessi, dimensioni e potenze; alcuni sono dotati di alimentatore integrato mentre altri hanno un alimentatore separato.

#### LMH2

Flussi luminosi:	850, 1250, 2000 e 3000 lm
CRI Ra:	> 90
Temperatura colore:	2700, 3000, 3500 e 4000K
Potenze:	da 10 a 37 W
Efficienza:	da 80 a 95 lm/w

### LMR2

Flussi luminosi:	650 lm
CRI Ra:	> 90
Temperatura colore:	2700, 3000, 3500 e 4000K
Potenze:	10 W
Efficienza:	65 lm/w

### LMR4

Flussi luminosi:	700, 1000 lm
CRI Ra:	> 90
Temperatura colore:	2700, 3000, 3500 e 4000K
Potenze:	da 10 a 15 W
Efficienza:	da 67 a 74 lm/w

### LMH6

Flussi luminosi:	2000, 2900 lm
CRI Ra:	> 90
Temperatura colore:	2700, 3000, 3500 e 4000K
Potenze:	da 27 a 37 W

Caratteristica comune di tutte e quattro le famiglie di moduli è la generazione del bianco mediante tecnologia “True White”. Tale tecnologia è simile in linea di principio alla “Briliant Mix” di Osram e consiste nell’utilizzare LED bianco verdi sopra la curva Planckiana abbinati a LED rossi o ambra (Figura 66). Il bianco viene ricavato per color mixing. L’aspetto più significativo di questo metodo è la possibilità di ottenere indici di resa cromatica estremamente elevati e alte efficienze anche per temperature colore relativamente basse. Per contro la gestione dell’alimentazione è sicuramente più complessa.



**Figura 66 Tecnologia True White - CREE**

L’emissione spettrale di questi moduli denota immediatamente la differenza rispetto al classico spettro dei LED a conversione di fosfori (sia remoti sia prossimali); il consistente picco sul rosso (tra 620 e 640 nm) conferisce allo spettro una forma che richiama l’andamento di una lampada ad incandescenza (Figura 67).

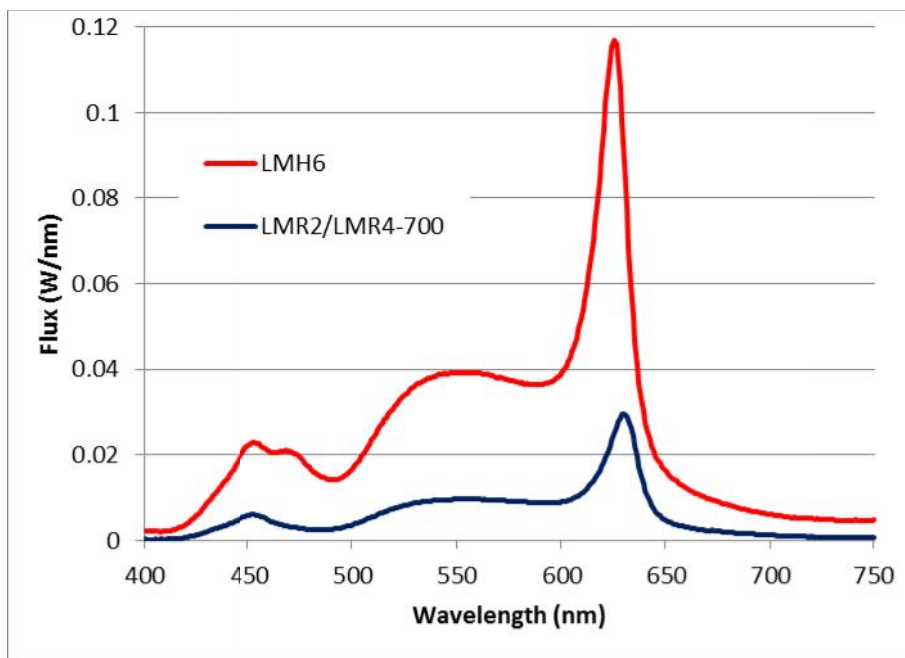


Figura 67 Emissione spettrale dei moduli CREE LM

Grazie allo spettro di emissione particolare si ottengono indici di resa cromatica elevati per tutti i 14 campioni cromatici dell'indice CRI (Figura 68).



Figura 68 Indici di resa cromatica parziali ( da R<sub>1</sub> a R<sub>14</sub>) relativi ai moduli CREE LM

## 12.2 PHILIPS

Il produttore che maggiormente sta puntando sui moduli e soprattutto su Zhaga è sicuramente Philips. Nel giro di due anni il portafoglio prodotti è stato enormemente ampliato. Al primo Fortimo (LLE con tecnologia a fosfori remoti) si sono affiancati tutta una serie di altri prodotti:

- Fortimo LED SLM
- Fortimo LED HBM
- Fortimo LED STRIP
- Fortimo LED HBM

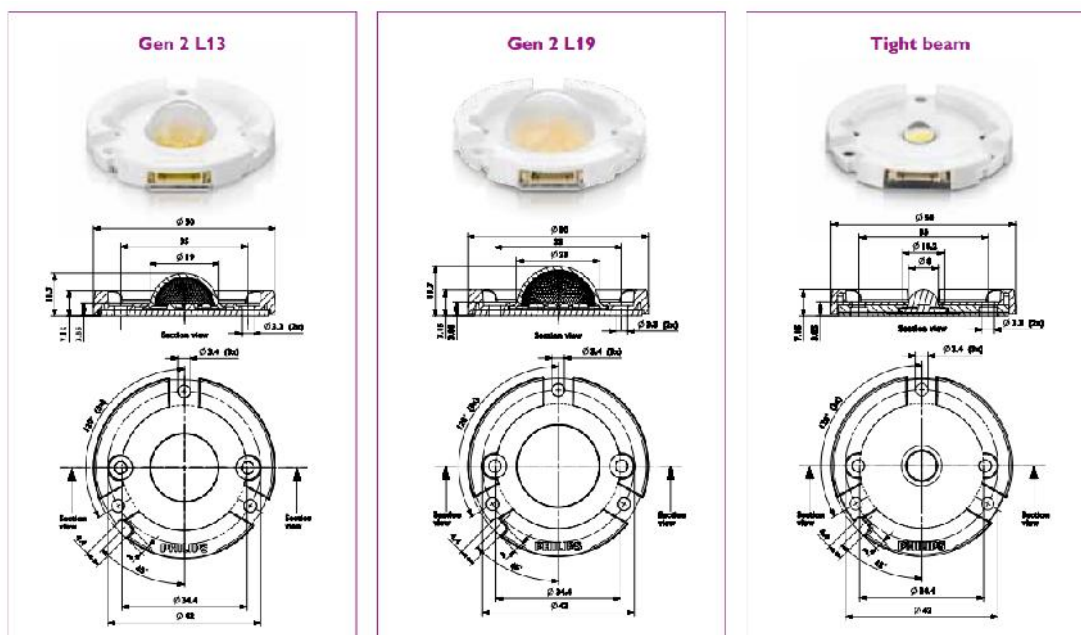
### 12.2.1 Fortimo LED SLM system



**Figura 69 – Esempi di Fortimo LED SLM**

I moduli LED Fortimo SLM corrispondono al Book 2 di Zhaga. Le sorgenti utilizzate sono Power LED (luxeon rebel ES e in alcuni casi anche LED CREE). Di seguito i dati principali:

Flussi luminosi:	800, 1100, 1500, 2000, 3000 lm
CRI Ra:	> 80
Temperatura colore:	3000, 3500 e 4000K
Tolleranza colore:	4 SDCM (Standard Deviation Color Matching)
Potenze:	da 11 a 43 W



**Figura 70 – Fortimo LED SLM Gen 2**

### 12.2.2 Fortimo LED High Brightness Module (HBMt)

Il Fortimo HBM è stato realizzato per applicazioni in esterno e fornisce flussi luminosi consistenti, fino a 6000 lm. E' basato sullo standard definito nel Book 4 di Zhaga.



Figura 71 – Fortimo LED HBMT e immagine del Book 4 di Zhaga

Flussi luminosi:	4000 o 6000 lm
CRI Ra:	> 70
Temperatura colore:	4000, 5700 K
Potenze:	da 35 a 54 W
Efficienza:	115 lm/W

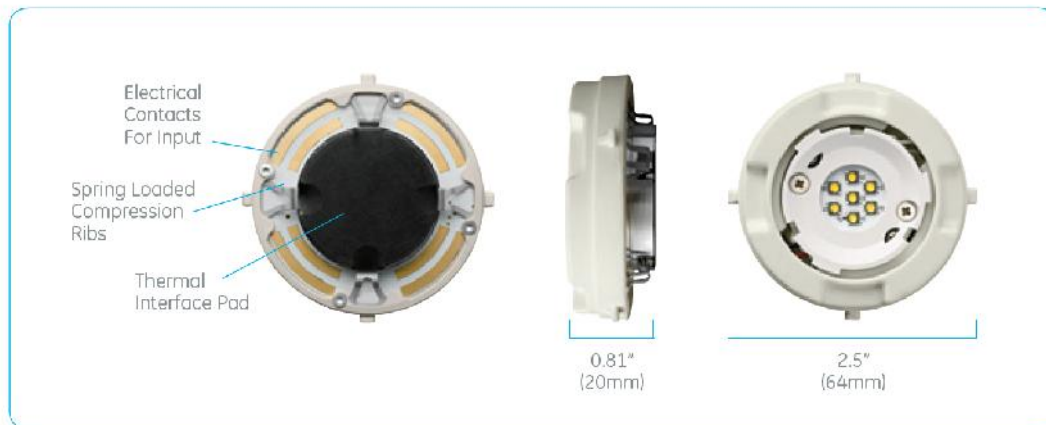
### 12.3 GE

Anche GE ha recentemente introdotto moduli Zhaga denominati “Infusion Module”.



Figura 72 – GE Infusion Module

Flussi luminosi:	da 850 a 3600 lm
CRI Ra:	80 o 90
Temperatura colore:	2700K, 3000K, 4000
Potenze:	da 35 a 54 W
Efficienza:	80 lm/W
Tolleranza colore:	2 o 4 SDCM (Standard Deviation Color Matching)



**Figura 73 GE Infusion Module: caratteristiche costruttive e dimensionali**

## 13 Sistemi ibridi: considerazioni per la progettazione di un motore luminoso

Un nuovo sistema di generazione di luce bianca è comparso da qualche tempo sul mercato e consiste nel combinare due tecnologie esistenti per creare luce con tonalità calda ed elevato indice di resa cromatica (CRI>90) e una elevata efficienza luminosa.

L'idea alla base della soluzione proposta, consiste nel combinare l'emissione di due LED, uno rosso o ambra e l'altro costituito da un LED bianco particolare, che presenta l'emissione spettrale spostata nella zona del verde. Questi LED sono prodotti con la tradizionale tecnologia a conversione di fosforo a partire da un emettitore blu con l'impiego di un fosforo verde<sup>a</sup>: il vantaggio è che quest'ultimo presenta un fattore di perdita di conversione molto contenuta ed è quindi in grado produrre, in combinazione con l'emissione blu del chip una sorgente luminosa molto efficiente.

La componente rossa, necessaria per ottenere una luce bianca a tonalità calda-neutra e un valore adeguato dell'indice di resa cromatica CIE-CRI, viene generata da un LED rosso, evitando le perdite nella conversione tramite fosforo.

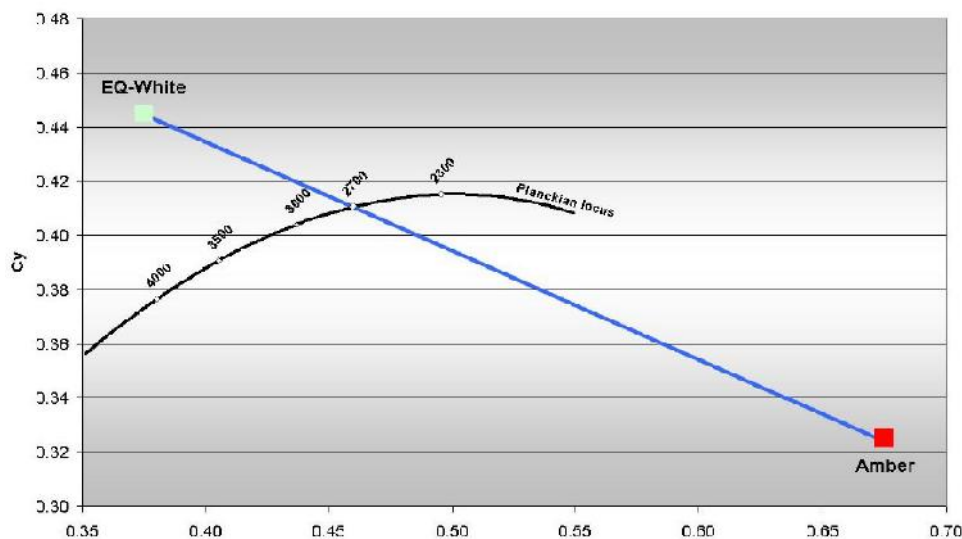
Dato che si usano due tipologie di sorgenti distinte, le cui emissioni devono essere miscelate tra di loro, potrebbe essere necessaria l'introduzione di un componente ottico (camera di miscelazione realizzata con materiali ad elevata riflettanza), al fine di garantire l'uniformità delle proprietà cromatiche anche in condizioni di campo vicino.

Soluzioni ottiche alternative prevedono l'impiego di riflettori, che consentono comunque di garantire una discreta uniformità cromatica se l'angolo solido di emissione risulta non troppo ristretto.<sup>b</sup>

Attraverso il sistema descritto, risulta possibile ottenere tutte le cromaticità nello spazio CIE 1931, che giacciono su una linea che unisce il LED EQ-WHITE e il LED ambra, semplicemente variando il rapporto tra il flusso emesso dai due componenti (Figura 74).

<sup>a</sup> "EQ-WHITE" è il nome commerciale di OSRAM Semiconductors per questa famiglia di dispositivi

<sup>b</sup> Soluzioni con ottiche TIR garantiscono performance, in termini di uniformità dell'emissione cromatica non ottimali e sono adatte quando l'oggetto illuminato è sufficientemente distante dall'apparecchio di illuminazione



**Figura 74 Rappresentazione nello spazio colore CIE 1931 del meccanismo di generazione della luce bianca mediante sistema ibrido**

Il sistema dovrebbe essere in grado di garantire un’efficienza luminosa migliore di 110 lm/W in combinazione con un valore di indice di resa cromatica elevato (CRI>90), che consente a questo sistema di essere impiegato in applicazioni come il retail o l’illuminazione di uffici.

La tabella della Figura 75, mostra, al variare della temperatura correlata di colore, i valori dell’indice di resa cromatica e i valori degli indici speciali relativi ai campioni R9 e R13 di un sistema ibrido messi a confronto con quelli ottenibili da sorgenti tradizionali<sup>a</sup>.

CCT	R <sub>a</sub>	R9	R13
Brilliant Mix 2700K	92	83	97
Brilliant Mix 3000K	91	78	98
Brilliant Mix 4000K	83	48	85
Compact metal halide lamp (Typ.)	82	27	93
Compact Fluorescent lamp (Typ.)	87	17	93

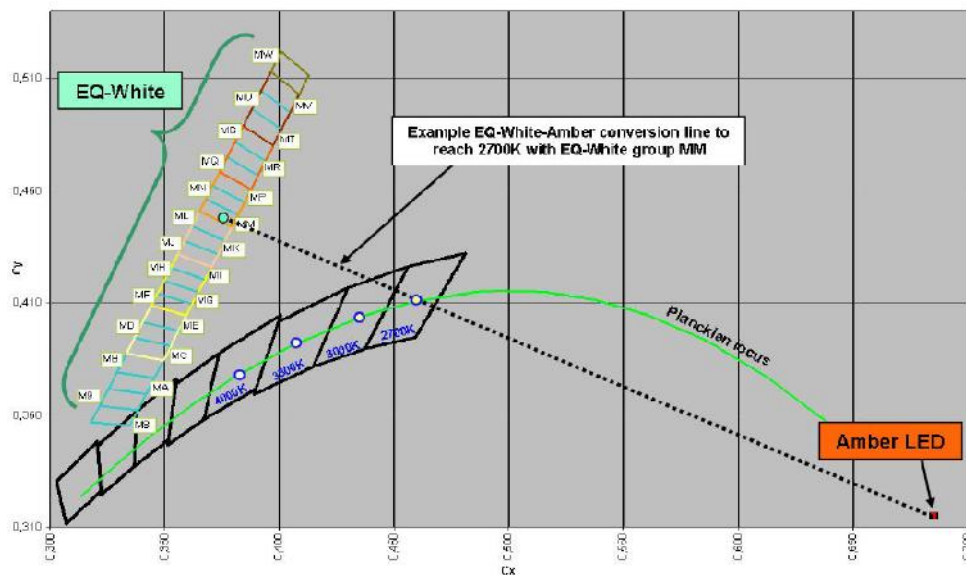
**Figura 75 Comparazione tra i valori dell’indice di resa cromatica Ra e degli indici speciali R9 e R13 ottenibili dal sistema ibrido e da sorgenti tradizionali**

La Figura 76 mostra la distribuzione dei bin per i LED EQ-WHITE, ottenuta per una temperatura del solder point T<sub>s</sub>=25°C: la tabella consente di individuare la selezione migliore del LED bianco verde, in funzione della temperatura di colore desiderata per la miscela risultante.

Per esempio desiderando ottenere una CCT pari a 2700K, considerando un LED ambra OSRAM LA CPDP, la migliore selezione di bianco EQ-WHITE risulta MM, che si ottiene tracciando la retta passante dal punto individuato dalle coordinate cromatiche del LED ambra nello spazio CIE 1931 e il punto del luogo Planckiano corrispondente alla CCT di 2700K e prolungando tale retta fino ad individuare un bin all’interno della distribuzione dei LED bianchi.

<sup>a</sup> OSRAM Opto Semiconductors, “Brilliant Mix-Professional White for General Lighting”, Application Note, January 2011



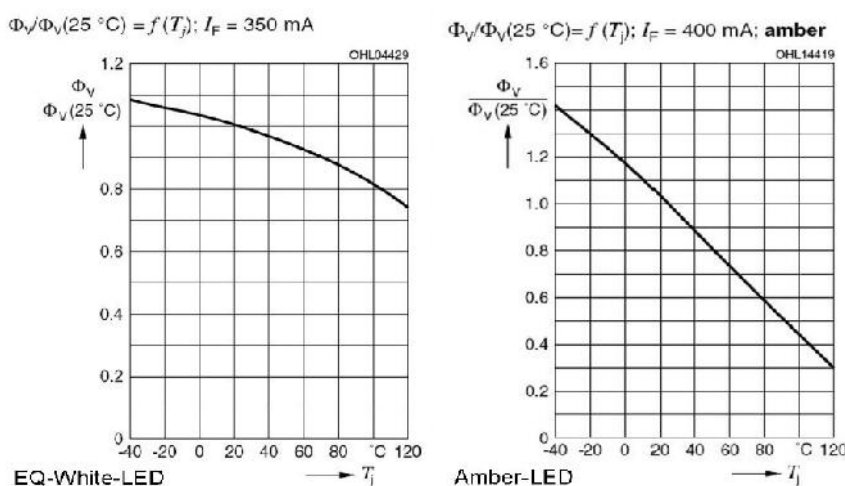


**Figura 76** Binning dei LED bianchi OSRAM EQ-WHITE (@Ts=25°C), nello spazio colore CIE 1931. Nello stesso grafico è stata riportata la cromaticità del LED ambrà (@Ts=25°C), utilizzato per la selezione del bin più appropriato per l’ottenimento di una miscela a CCT 2700K.

Le coordinate cromatiche del LED ambrà, nello spazio colore CIE 1931, stimate sulla base delle informazioni riportate nel datasheet ( $\lambda_{dom}=617\text{ nm}, \Delta\lambda=16\text{ nm}$ ), risultano le seguenti  $x=0.6849, y=0.3149$ .

Il problema principale da affrontare con questo tipo di tecnologia riguarda la differente dipendenza del flusso emesso dalla temperatura per i due dispositivi LED, come mostrato alla Figura 77: se inizialmente il rapporto tra i flussi emessi (dipendente dal numero di dispositivi impiegati e dalla corrente di alimentazione) è tale da ottenere una miscela luminosa con la cromaticità desiderata, però al crescere della temperatura di giunzione, il differente comportamento termico dei due dispositivi comporta una variazione dello spettro risultante e quindi differenti caratteristiche cromatiche, di temperatura correlata di colore e di resa cromatica.

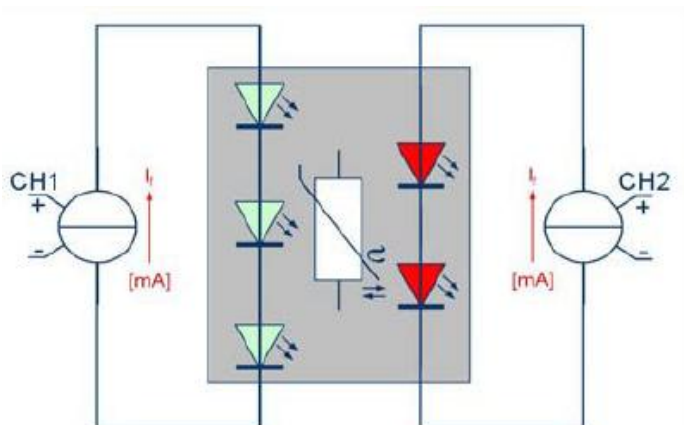
Occorre poi ricordare, che la temperatura di giunzione influenza anche la lunghezza d’onda dominante del LED ambrà, che contribuisce a fare variare le coordinate cromatiche della componente rossa/ambrà.



**Figura 77** Dipendenza del flusso emesso dalla temperatura di giunzione: a sinistra per il LED bianco-verde e a destra per il LED rosso/ambrà.

Supponendo di alimentare le due tipologie di sorgenti ciascuna con un generatore di corrente costante, le soluzioni al problema possono essere tre:

- Fissare una temperatura di giunzione per i LED e regolare il numero di ciascun componente e il rapporto delle correnti in modo tale che al raggiungimento del regime termico sul PCB, la luce emessa abbia la cromaticità desiderata. Con questa soluzione la CCT e le coordinate cromatiche varieranno durante il transitorio di riscaldamento e una volta raggiunto si avrà una dipendenza di queste due grandezze dalla temperatura ambiente
- Utilizzare un termistore sul PCB per rilevare la temperatura al solder point (legata alla temperatura di giunzione) e di regolare il rapporto delle correnti nei due rami in funzione della temperatura (Figura 78): si ottengono in questo modo una migliore stabilità della temperatura di colore e della cromaticità, del flusso emesso, durante le fasi di riscaldamento del modulo LED e a raggiungimento dell'equilibrio termico e una minore dipendenza delle performance dalla temperatura ambiente. Sono possibili poi dei vantaggi accessori, quali la protezione termica dei LED in caso di malfunzionamento e la possibilità di dimming del flusso luminoso emesso
- Inserire all'interno della camera di miscelazione un sensore di colore, capace di valutare la potenza ottica in tre differenti bande spettrali, centrate sul blu, sul verde e sul rosso e regolare il rapporto delle correnti dei due rami in modo tale da ottenere la cromaticità desiderata per la miscela risultante. Con questa soluzione, si ottengono una buona stabilità della temperatura di colore, della cromaticità, del flusso emesso, sia durante la fase di riscaldamento del modulo LED sia al raggiungimento dell'equilibrio termico e una minore dipendenza delle caratteristiche di emissione dalla temperatura ambiente.



**Figura 78 Schema di principio di un sistema di alimentazione a corrente costante a due canali separati, a CCT costante sia in fase di transitorio che a regime, compensato rispetto alla temperatura ambiente**

Fissato il range di temperatura del Solder Point ( $T_s$ ), è possibile determinare il Bin del LED EQ-White al fine di ottenere il desiderato valore di CCT (2700K- 3000K- 4000K) della miscela (Figura 79).

$T_s$	CCT	Bin EQ-WHITE
65-75 °C	4000K	MD
75-95 °C		ME
65-85 °C	3000K	MK
85-95 °C		ML
65-85 °C	2700K	MN
85-95 °C		MP

**Figura 79 Bin per i LED bianchi EQ-White in funzione della temperatura del Solder Point e della CCT desiderata per la miscela**

Al fine di valutare completamente le potenzialità di tale soluzione, sono stati digitalizzati gli spettri riportati nel datasheet del LED EQ-WHITE e attraverso un processo di ottimizzazione vincolata è stata determinata le percentuali di flusso del LED ambra e del bianco che garantissero una miscela a 3000K e a 4000K, con

indice di resa cromatica maggiore di 80 che minimizzassero la distanza euclidea tra il punto del luogo Planckiano e quello individuato dalla miscela nello spazio colore CIE 1931.

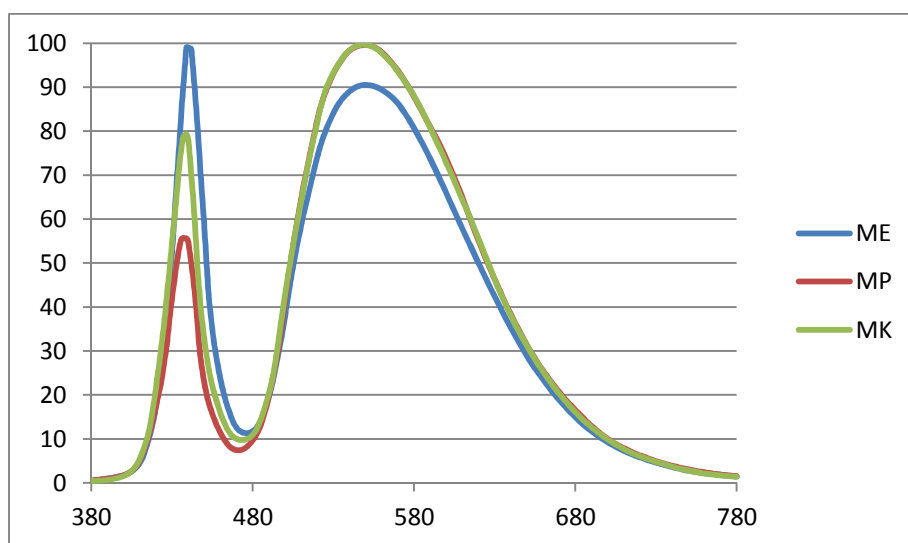
	EQ-White		Amber		x	y	u'	v'	U(uv)	CRI	R9	R13	LER (lm/W)
	CCT Target (K)	CCT Miscela (K)	p1%	p2%									
<b>Sist. Ibrido</b>	3000	2967	84.63	15.37	0.4530	0.4343	0.2480	0.5350	0.0094	92	88	97	355
<b>Sist. Ibrido</b>	4000	3949	91.73	8.27	0.3870	0.3933	0.2228	0.5096	0.0057	82	53	84	342

**Figura 80** Caratteristiche di efficacia, cromaticità e resa del colore delle miscele a 3000K e 4000K ottenute dal processo di ottimizzazione vincolata

La Figura 80 mostra i risultati ottenuti, dove si osserva che l'indice di resa cromatica Ra risulta sufficientemente elevato per una applicazione da ufficio (buona resa cromatica dei rossi) e in buon accordo con i dati dichiarati dal costruttore. L'ultima colonna della tabella mostra il valore del LER, che risulta elevato a dimostrazione dell'efficacia di questa soluzione.

Migliori risultati nella generazione del bianco a 4000K si sarebbero potuti ottenere scegliendo con maggiore cura il binning del LED bianco (la miscela è stata creata scegliendo la migliore distribuzione spettrale tra quelle riportate nel datasheet del prodotto).

Si osserva inoltre che per ottenere un bianco variabile tra 2700K e 6500K, è necessario anche controllare la quantità di blu (mediante l'aggiunta di un terzo canale), ora fissata dalla scelta della selezione del LED bianco (Figura 81): a fronte di una complicazione circuitale sarebbe possibile anche ridurre il  $\Delta(u,v)$ , contribuendo a creare una miscela molto più prossima al luogo Planckiano per la temperatura correlata di colore considerata.



**Figura 81** Spettri normalizzati di tre selezioni dei LED EQ-WHITE, dove si osserva il differente rapporto tra la potenza emessa nella banda del blu e quella nella banda del giallo-verde.

Un esempio di tale sistema è rappresentato alla Figura 82: si tratta di un sistema a 4 canali (con due differenti bianchi, di cui uno spostato sulla zona del verde, un LED ambra e un LED blu), capace di produrre un bianco variabile tra 2700K e 6500K, con indice di resa cromatica maggiore di 90 per l'intero intervallo di tonalità della luce.

Il sistema possiede due diversi sistemi per il controllo della temperatura di colore della luce emessa: una retroazione basata su un sensore di temperatura posto sul MCPCB che ospita le sorgenti LED e un secondo sistema che utilizza un sensore di colore (RGB), posto all'interno della camera di miscelazione in cui sono contenute le sorgenti luminose.

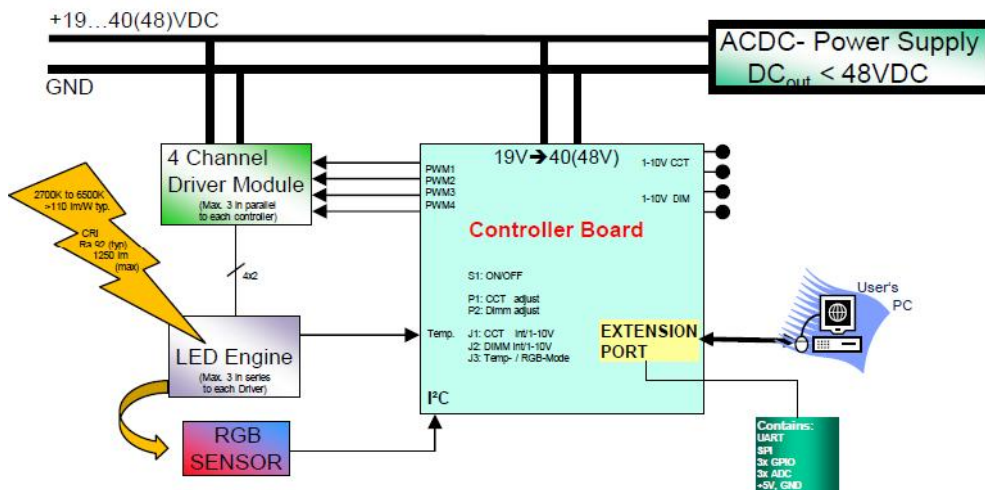


Figura 82 OSRAM Brialliant mix demo-kit: schema di principio<sup>a</sup>

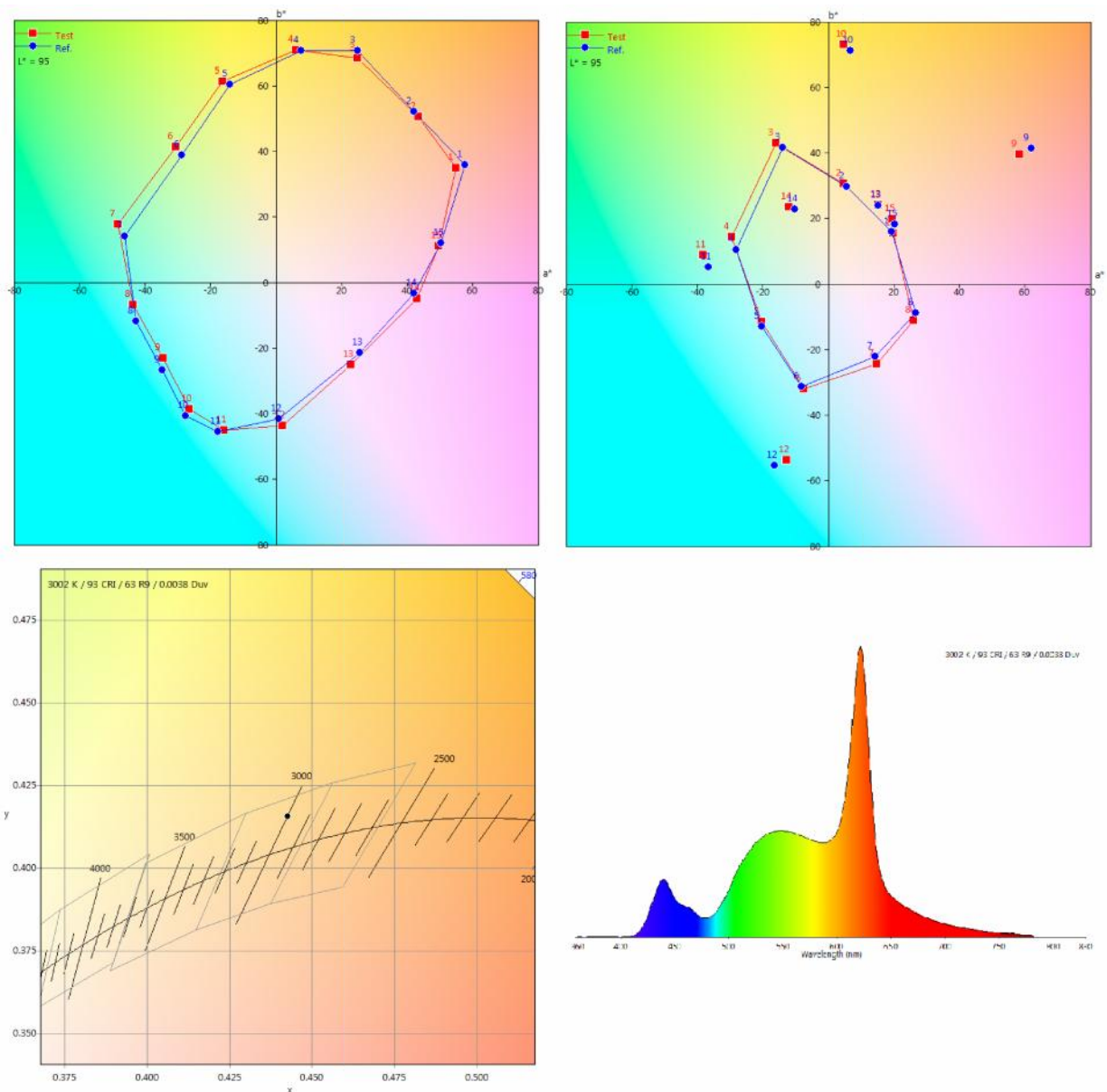
Utilizzando il demo-kit Brilliant Mix di Osram , sono state valutate le miscele prodotte a due differenti temperature di colore: 3000K e 4000K: in questo modo è possibile un confronto, anche se sommario, con le altre soluzioni esaminate.



Figura 83 Demo kit Brialliant mix utilizzato per le valutazioni di efficienza ottica di radiazione e resa cromatica

Occorre tuttavia osservare che i risultati ottenuti sono solo di prima approssimazione, dato che il demo-kit non dispone di un vero e proprio sistema di dissipazione termica né la camera di miscelazione è costruita con materiali altamente riflettenti e dotati di fattore di riflessione costante nello spettro del visibile. Le misure sono state effettuate utilizzando il sistema configurato mediante controllo della temperatura sul PCB e regolando il dimming in modo tale che il sistema producesse il massimo flusso possibile. La misura è stata effettuata dopo aver atteso 10' di funzionamento del sistema, regolando la CCT dal valore massimo possibile al valore minimo ed acquisendo lo spettro, in direzione ortogonale alla finestra di emissione, per verificare il raggiungimento della CCT desiderata.

<sup>a</sup> Datasheet Brilliant mix System Description-Demo kit for Evaluation Purpose, Elec-Con Technology GmbH, Release February 2013



**Figura 84 Sistema ibrido regolato a 3000K: In alto gamut area dei campioni utilizzati per il calcolo dell'indice Ra, a sinistra la gamut area, nello spazio CIE Lab, ottenuta dall'impiego dei campioni dell'indice CQS**

La miscela prodotta dalla soluzione ibrida, presenta una temperatura di colore di 3037 K, un valore dell'indice di resa cromatica  $R_a=93$  e un valore del LER=350 lm/W, confermando l'efficacia di questa particolare soluzione tecnica. Il valore del campione  $R_9$ , di norma critico per tutte le sorgenti LED, risulta pari a 69. Il valore dell'indice  $Q_a=92$  risulta pari a  $R_a$ , anche se questo indice non penalizza l'aumento della saturazione dei campioni e considera il valore quadratico medio della variazione di colore relativa a 15 campioni di colore saturi.

Dall'esame della Figura 84, con riferimento ai campioni saturi utilizzati per il calcolo del CQS, si osserva un aumento della saturazione nei campioni giallo verdi, con una distorsione contenuta delle tinte, nella zona dei rossi si osserva una maggiore saturazione con distorsione della tinta (per esempio il campione  $Q_2$ ). Anche la zona degli azzurri (campioni  $Q_8$  e  $Q_9$ ) si osserva una distorsione delle tinte, da cui una diminuzione degli indici speciali del CQS, come mostrato alla Figura 85.

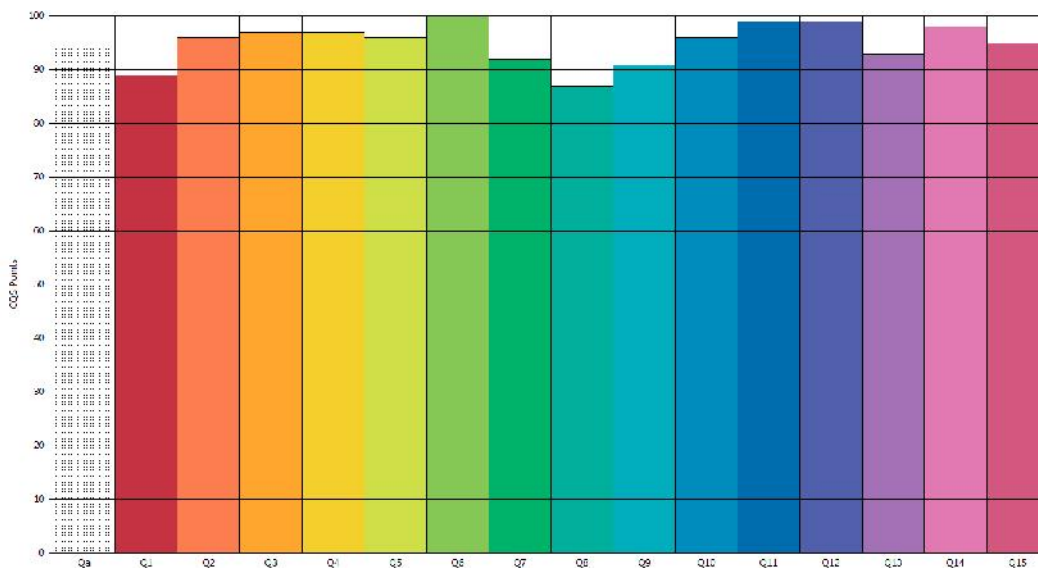


Figura 85 Campioni speciali Qi dell'indice CQS per la miscela a 3000K

La miscela a 4000K, presenta un valore di LER leggermente inferiore 321 lm/W, ma un valore dell'indice  $R_a=94$  leggermente superiore al precedente. La resa del rosso profondo  $R_9=64$  si è mantenuta attorno al valore precedente. Il valore dell'indice CQS  $Q_a=94$ , è leggermente migliorativo rispetto alla temperatura di colore più calda.

Le distorsioni di tinta più evidenti sono nel campione  $Q_{10}$  e  $Q_{11}$ , mentre si osserva un aumento della saturazione nella zona del giallo-verde, in analogia alla tonalità più calda esaminata. La maggiore distorsione della tinta si ha per il campione  $Q_{13}$ .

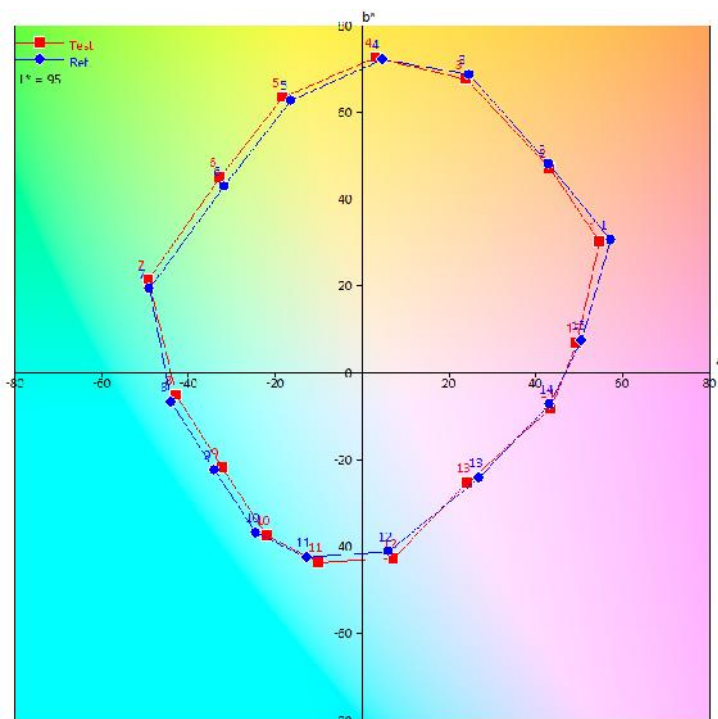
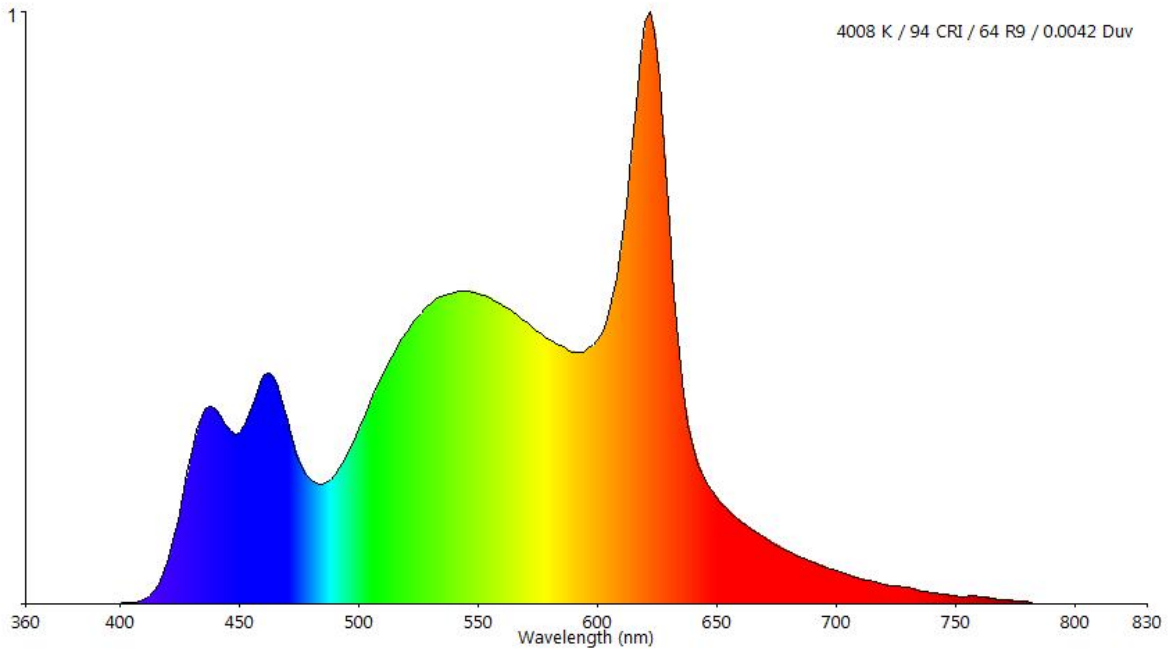


Figura 86 Gamut area nello spazio CIE Lab relativo ai campioni di colore saturi dell'indice CQS

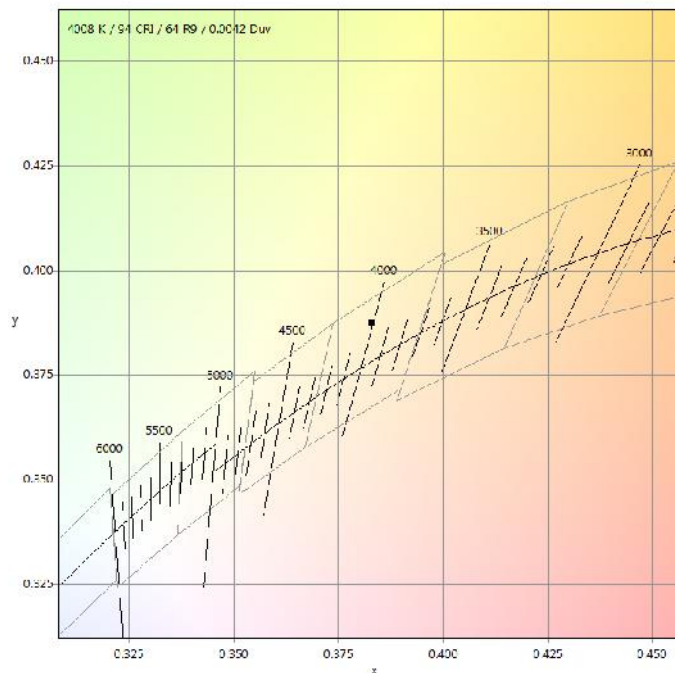
La distribuzione spettrale della miscela a 4000K è rappresentata alla Figura 87, dove le differenze maggiori rispetto al caso precedente sono nell'emissione del blu.

Caratteristica comune ad entrambe è il fatto che la cromaticità non giace sul luogo Planckiano, ma su una sua isoterma ad una distanza  $\Delta(u,v)$  positiva, sempre contenuta nel quadrangolo ANSI C78.337 2008 che definisce il binning cromatico delle sorgenti luminose.



**Figura 87 Distribuzione spettrale miscela a 4000K**

I valori degli indici speciali del CQS, sono riportati in dettaglio alla Figura 89, dove si osserva che complessivamente le performace di resa cromatica di questa sorgente soddisfano ampiamente i requisiti previsti per il normale lavoro da ufficio.



**Figura 88 Cromaticità della miscela a 4000K**

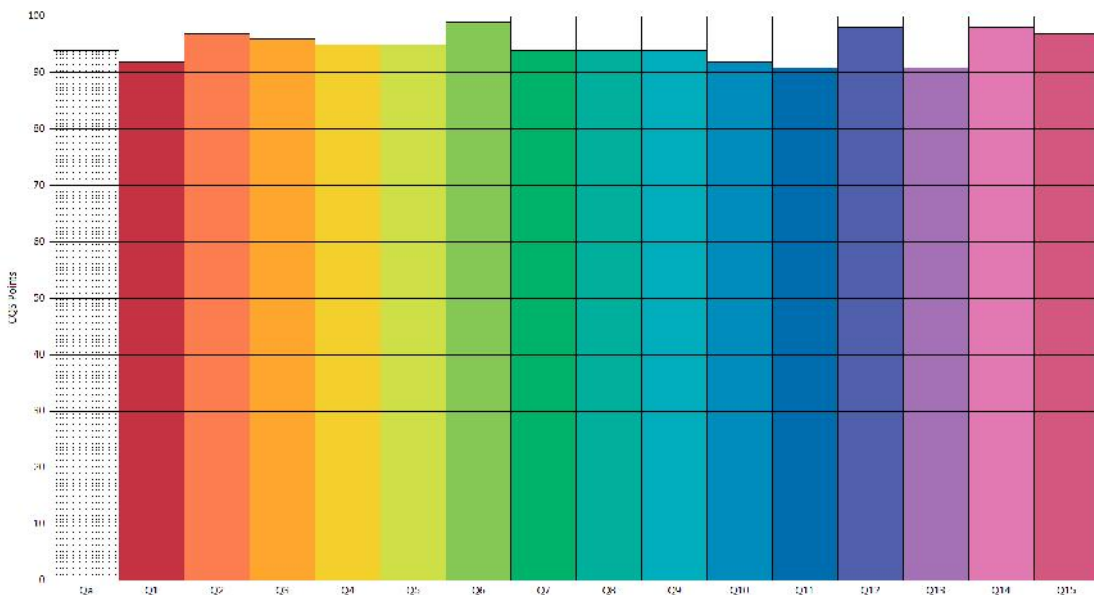


Figura 89 Indici speciali CQS per la miscela a 4000K

## 14 COB Tunnable White: considerazioni preliminari per la progettazione di un motore luminoso

L’impiego dei COB rappresenta una valida alternativa alla tecnologia ibrida per la realizzazione di sistemi a bianco dinamico per applicazioni di illuminazione di ufficio.

Tra i molti prodotti disponibili sul mercato, si è posta l’attenzione su un prodotto Sharp Tiger Zenigata, costituito da un COB in cui la deposizione del fosforo avviene a righe alternate per realizzare un’emissione calda-fredda all’interno del medesimo dispositivo.

Regolando opportunamente il rapporto delle correnti nei due rami, è possibile ottenere una sorgente a luce bianca, con temperatura di colore variabile tra 2800K e 5500K, come mostrato dalla Figura 90; per una miscela a 3700 K i risultati sono quelli mostrati alla Figura 91, in termini di distribuzione spettrale e cromaticità.

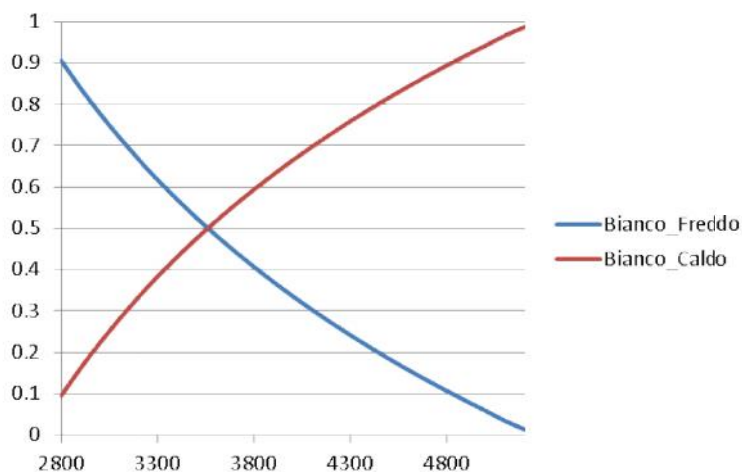
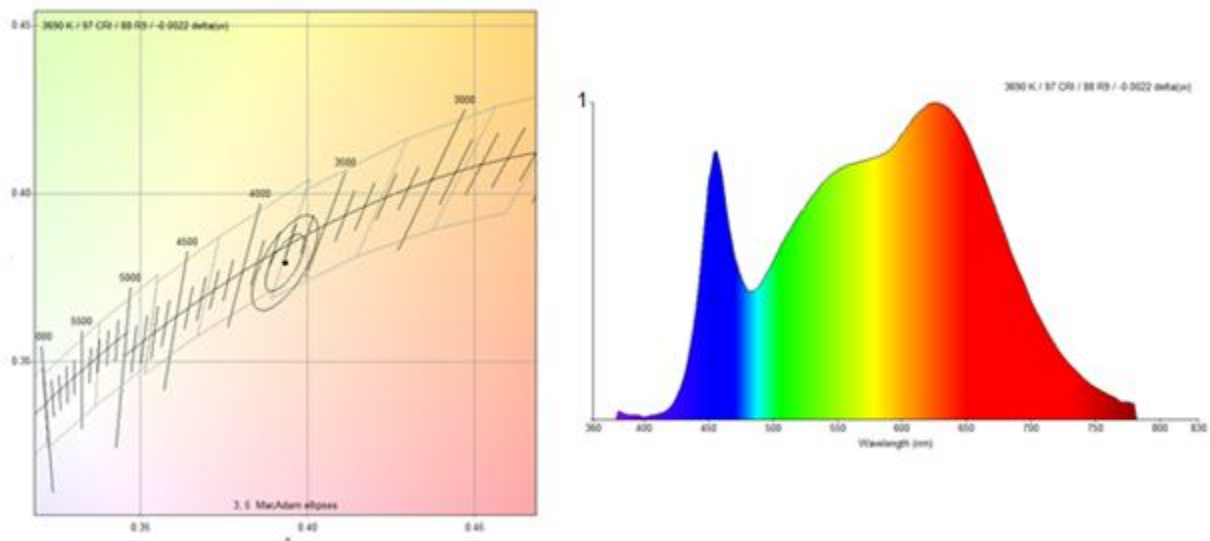


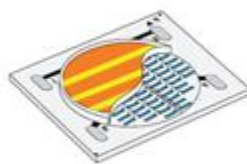
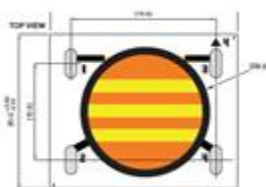
Figura 90 Percentuale del flusso luminoso di ciascuno dei due canali al fine di ottenere un bianco dinamico nel range di temperature 2800K – 5500K.





**Figura 91 Distribuzione spettrale e cromaticità della miscela a 3700K ( $R_a=97$ ,  $R_g=88$ ,  $LER=277$  lm/W). Le percentuali di flusso sono 47.90% per il ramo caldo e 52.10% per quello del freddo.**

Al fine di valutare l'efficacia della soluzione e le caratteristiche spettrali delle miscele ottenibili dal pilotaggio dei due circuiti con differenti valori di intensità di corrente, a partire dalle misure della distribuzione spettrale del dispositivo, sono state determinate le percentuali di flusso luminoso dei due canali al fine di ottenere delle miscele a temperatura di colore rispettivamente di 3000K e 4000K, con indice di resa cromatica maggiore di 90 e che minimizzassero, nello spazio colore CIE 1931, la distanza euclidea con il punto del luogo Planckiano alla corrispondente temperatura.



**Figura 92 Sharp Tiger Zenigata : nella figura si vede la disposizione alterata dei fosfori che consentono di ottenere due differenti temperature di colore (bianco caldo a 2700K e freddo a 5700K). A sinistra un esemplare del dispositivo, montato su dissipatore passivo, utilizzato per le misure spettrali utilizzate nelle diverse elaborazioni**

Dall'esame dei dati della Figura 93, si osserva che i valori del LER sono inferiori a quelli ottenibili con la soluzione ibrida, anche se l'indice di resa cromatica della soluzione basata su COB risulta decisamente migliore, persino eccessivo per una normale applicazione da ufficio<sup>a</sup>.

<sup>a</sup> Ci si deve infatti aspettare che al crescere del valore dell'indice di resa cromatica, l'efficacia luminosa (LER) della sorgente decresca. Si veda a tale proposito il seguente articolo: Talha Erdem, Sedat Nizamoglu, Xiao Wei Sun and Hilmi Volkan Demir, «A photometric investigation of ultra-efficient LED with high color rendering index and high luminous efficacy employing nanocrystal quantum dot luminophores», 4 January 2010 / Vol. 18, No. 1 / OPTICS EXPRESS 340

			Caldo		Freddo								
	CCT Target (K)	CCT Miscela (K)	p1%	p2%	x	y	u'	v'	U(uv)	CRI	R9	R13	LER (lm/W)
Tiger Zenigata	3000	2929	83.43	16.57	0.4388	0.4001	0.2535	0.5201	-0.0018	97	85	100	269
Tiger Zenigata	4000	3946	38.37	61.63	0.3817	0.3741	0.2270	0.5006	-0.0016	96	86	98	279

Figura 93 Caratteristiche cromatiche e di efficacia luminosa(LER)LED di due miscele 3000K e 4000K.

Questa soluzione ha il vantaggio di fornire una soluzione costruttivamente molto semplice al problema di creare una sorgente con bianco dinamico: richiede infatti un numero molto basso di componenti e produce risultati di elevata qualità dal punto di vista della resa cromatica.

La tabella che segue riassume i risultati ottenuti dai diversi sistemi di generazione di luce bianca esaminati per due differenti temperature di colore (3000K e 4000K): la soluzione con la maggiore efficacia luminosa (LER) è quella relativa al sistema ibrido a fronte però di una maggiore complicazione costruttiva del sistema.

Sistema	CCT Target (K)	CCT Miscela (K)	x	y	u'	v'	U(uv)	CRI	R9	R13	LER (lm/W)
Sist. Ibrido	3000	2967	0.4530	0.4343	0.2480	0.5350	0.0094	91.9	87.5	97.0	355.17
Sist. Ibrido	4000	3949	0.3870	0.3933	0.2228	0.5096	0.0057	82.0	52.8	83.5	342.27
Tiger Zenigata	3000	2929	0.4388	0.4001	0.2535	0.5201	-0.0018	97.2	84.6	99.5	268.90
Tiger Zenigata	4000	3946	0.3817	0.3741	0.2270	0.5006	-0.0016	96.0	86.2	98.0	279.02
CL830	3000	3021	0.4346	0.4019	0.2502	0.5202	-0.0005	79.0	8.5	78.3	326.00
CL840	4000	4169	0.3715	0.3648	0.2240	0.4949	-0.0030	78.0	9.0	78.0	324.00

La soluzione a fosfori remoti rappresenta il migliore compromesso tra LER e indice di resa cromatica, tenuto conto delle esigenze derivanti dalle normali attività che si svolgono in un generico ambiente di ufficio.

## 15 Ulteriori misurazioni effettuate

Le misurazioni di laboratorio effettuate sono state molteplici ed hanno riguardato essenzialmente dei dimostratori per la tecnologia a fosfori remoti (demo kit Intematix) e alcuni moduli a tecnologia ibrida presenti sul mercato, utilizzati come termine di confronto. Per completare il panorama di tutte le possibilità offerte dal mercato è stato considerato un COB di produzione Sharp, che offre la possibilità di bianco dinamico (aspetto di grande interesse per l'illuminazione di uffici).

Il demo kit per la tecnologia a fosfori remoti è composto da una camera di miscelazione in materiale plastico il cui interno è ricoperto di un foglio di MCPET Furukawa. La camera di miscelazione è dotata di 6 LED Rebel Blu ES della Lumiled e da 5 differenti elementi circolari ChromaLit (fosfori remoti) con diametro 61.5 mm a differenti CCT e CRI:

- 2700K, 90CRI (part number: CL-927-LR-PC)
- 3000K, 90CRI (part number: CL-930-LR-PC)
- 3000K, 80CRI (part number: CL-830-LR-PC)
- 3500K, 80CRI (part number: CL-835-LR-PC)
- 4000K, 80CRI (part number: CL-840-LR-PC)



Figura 94 –Demo Kit ChromaLit Intematix

Oltre ai campioni standard sono stati misurati due campioni su base vetro. Le specifiche dei LED contenuti nella camera di miscelazione sono indicate alla Tabella 2.

Tabella 2 – Specifiche del Kit ChromaLit Intematix

Input Power (Welectrical) 12.5W		Radiant Flux (Wrad) 5.5W		Efficacy (Wrad/Welectrical) 44%	
CCT	Input Power	Flux	CRI	Conversion Efficacy (lm/W <sub>rad</sub> )	System Efficacy (lm/W)
2700K	12.4W	770lm	90	145	70
3000K	12.4W	950lm	80	200	97
3500K	12.4W	980lm	80	205	100
4000K	12.4W	1000lm	80	210	100
5000K	12.4W	1100lm	70	230	112

Oltre alla camera di miscelazione in plastica della Intematix le misurazioni dei fosfori Chromalit sono state effettuate con una camera della CerFlex<sup>a</sup> (CUBILUX MC-100-LR-PC-6) (Figura 95).



Figura 95 – Camera di miscelazione CerFlex

Il LED utilizzato sia nella camera di miscelazione Intematix sia sul MC-PCB da impiegarsi in combinazione con la camera ceramica CerFlex, è un Luxeon Rebel Royal Blu.

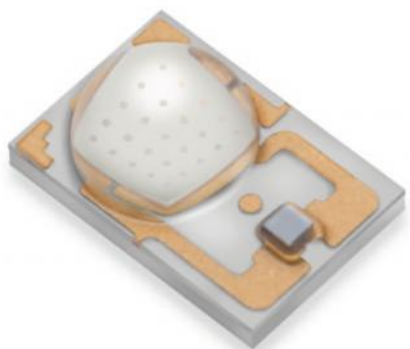


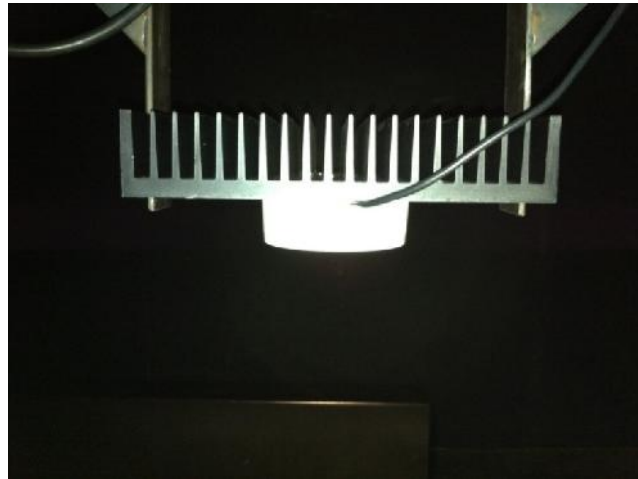
Figura 96 – Luxeon Rebel ES Royal Blu

### 15.1 Misurazioni fotometriche

I flussi luminosi emessi dalla camera di miscelazione campione (sia Cerflex che il modulo Intematix) con differenti fosfori remoti Chromalit sono stati misurati sia sul goniometro sia in sfera integratrice presso il lab. Luce del Politecnico di Milano. Nel caso di misurazione sul goniometro, i rilievi per tutti i campioni a disposizione sono stati effettuati a correnti di 350 mA e di 550 mA.

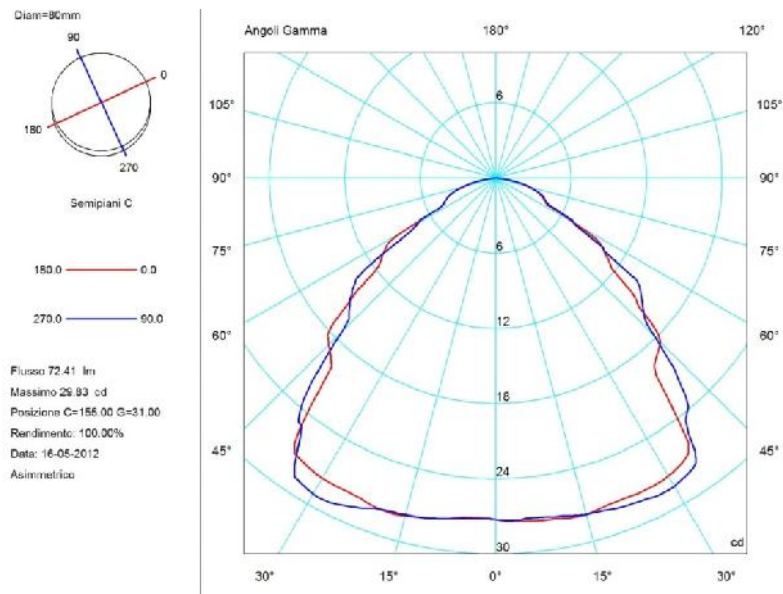
---

<sup>a</sup> Ad oggi tale dispositivo non è più disponibile sul mercato a causa del fallimento dell'azienda produttrice.



**Figura 97 – Camera campione Intematix con relativo dissipatore.**

I passi di misurazione sono stati settati a 5° sui piani C e 1° per l'angolo  $\gamma$ . Prima di misurare la camera completa di Chromalit è stata misurata la camera con i soli LED blu. In Figura 98 è rappresentato il diagramma polare della camera di miscelazione senza fosfori (LED blu), mentre in Figura 99 è rappresentato il diagramma polare della camera di miscelazione Intematix con Chromalit CL-835-LR-PC a 350 mA.



**Figura 98 – Diagramma polare della camera di miscelazione Intematix senza fosfori**

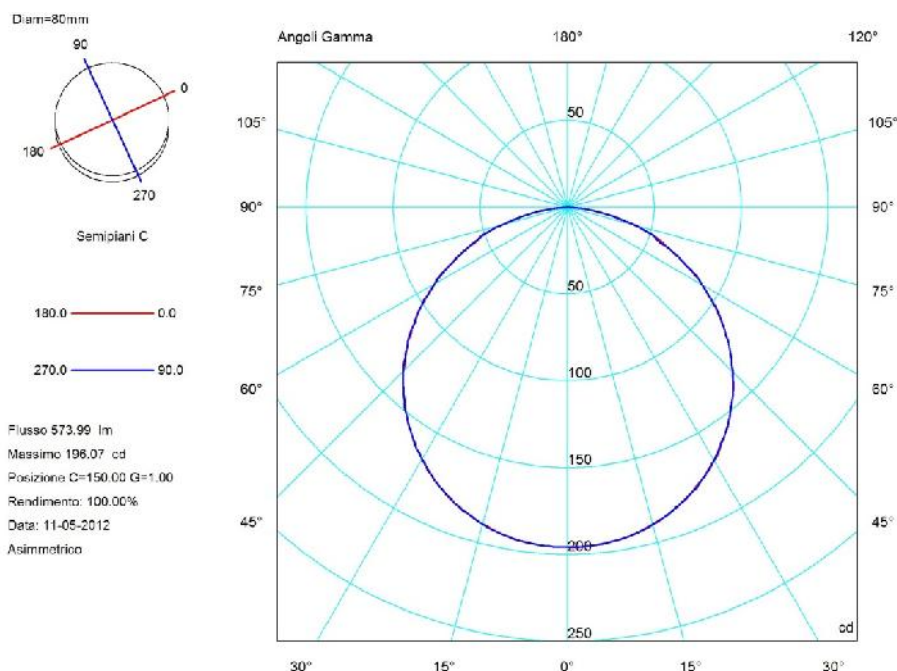


Figura 99 – Diagramma polare della camera di miscelazione Intematix con Chromalit CL-835-LR-PC a 350 mA.

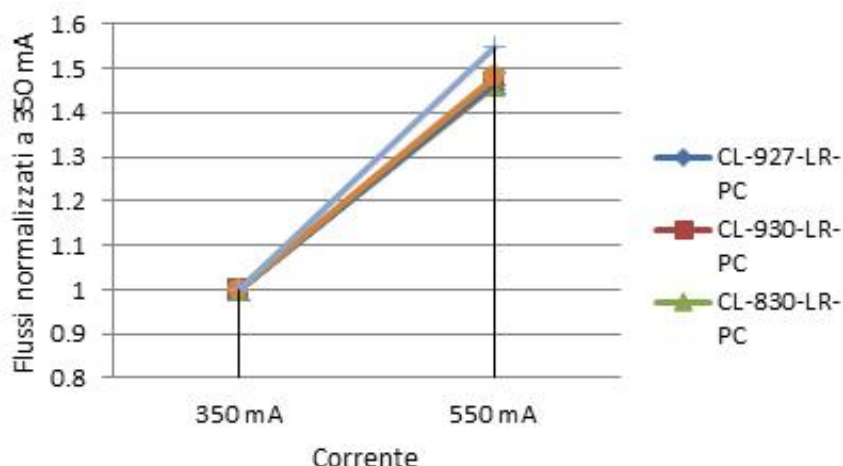
Non ci sono differenze sostanziali nelle forme dei diagrammi polari di Chromalit a differenti temperature colore o CRI. Tutte presentano la classica emissione approssimativamente lambertiana (semi-aperture di 57° + 57° circa).

In Tabella 3 sono rappresentati i flussi luminosi emessi dai differenti campioni di Chromalit a 350 e a 550 mA. In base a questi dati è già possibile fare un’analisi della emissione del flusso luminoso in funzione delle correnti di pilotaggio.

Tabella 3 Flussi luminosi a differenti correnti di pilotaggio (Camera Intematix)

	350 mA	550 mA
<b>CL-927-LR-PC</b>	444,91	649,57
<b>CL-930-LR-PC</b>	471,87	692,78
<b>CL-830-LR-PC</b>	573,99	837,78
<b>CL-835-LR-PC</b>	584,24	857,49
<b>CL-840-LR-PC</b>	600,16	884,91
<b>CL 830 ARTEMIDE</b>	532,15	787,05
<b>LED BLU camera Intematix</b>	72,41	112,21

Se confrontiamo i valori normalizzati dei flussi a 350 mA (Figura 100) notiamo che la linea di tendenza dei LED Blu ha un’inclinazione maggiore rispetto a quella dei fosfori remoti; da ciò si evince che l’aumento di temperatura sui fosfori determina una riduzione delle performances. Questa diminuzione non sembra essere legata in modo sostanziale a temperatura colore o indice di resa cromatica. Per una verifica di questa tendenza sono state effettuate delle misurazioni di flusso in sfera integratrice variando la corrente di pilotaggio da 350 mA a 700 mA a passi di 50 mA e verificando la temperatura su fosfori e su PCB.



**Figura 100** Flussi normalizzati a 350 mA (Camera Intematix)

La misurazione dei parametri elettrici durante i rilievi fotometrici ha permesso di valutare le efficienze dei differenti moduli. In Tabella 4 sono rappresentati i valori calcolati delle efficienze a 350 e a 550 mA. Il valore massimo di efficienza si ottiene come previsto a valori di rese cromatiche inferiori e temperature colore superiori.

**Tabella 4 – Efficienze dei fosfori remoti Chromalit a 350 e a 550 mA (camera Intematix)**

	Potenza el. assorbita (W) @350mA	Potenza el. assorbita (W) @550mA	lm/W @350 mA	lm/W @550 mA
<b>CL-927-LR-PC</b>	6,0290	9,6617	73,7950	67,2314
<b>CL-930-LR-PC</b>	6,0295	9,6628	78,2602	71,6956
<b>CL-830-LR-PC</b>	6,0341	9,6573	95,1244	86,7510
<b>CL-835-LR-PC</b>	6,0347	9,6578	96,8134	88,7873
<b>CL-840-LR-PC</b>	6,0350	9,6407	99,4466	91,7890
<b>CL 830 ARTEMIDE</b>	6,0293	9,6710	88,2607	81,3825
<b>LED BLU</b>	6,0279	9,6779		

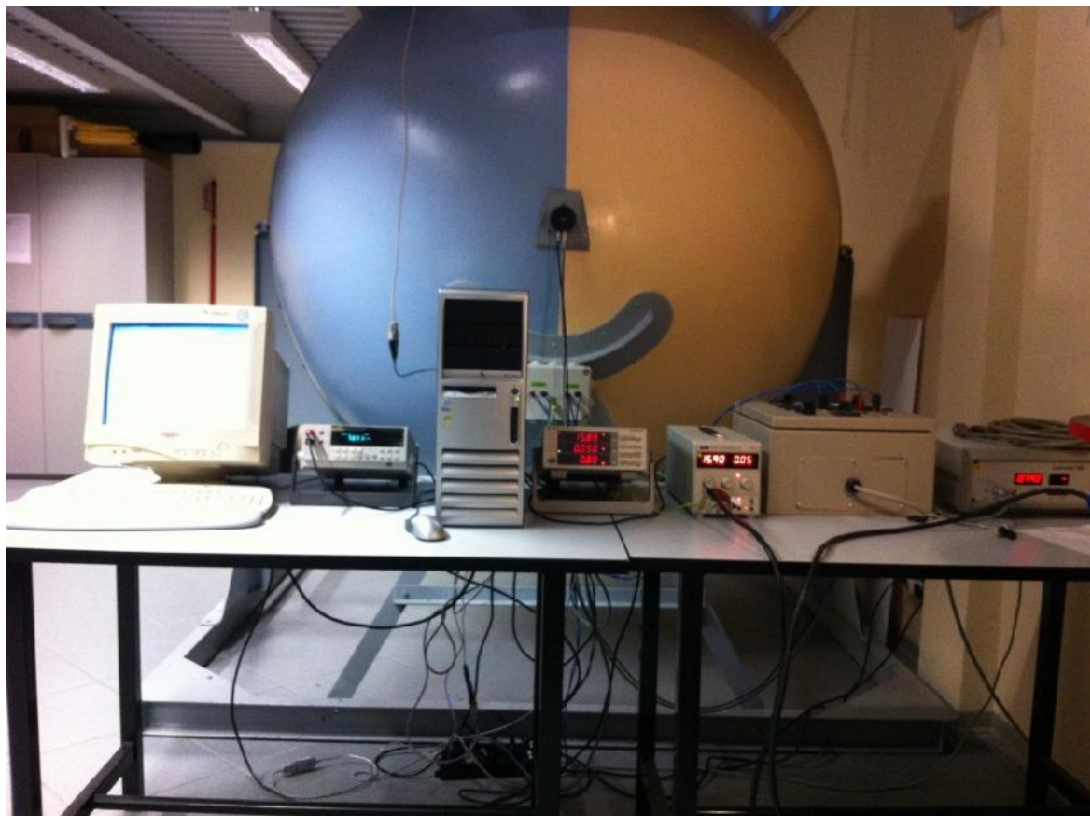
Le misurazioni sono state effettuate anche sulla camera di miscelazione della Cerflex su due tipologie di fosfori (oltre che con i soli LED blu): CL 830 e CL930. In questo caso le correnti di pilotaggio sono state di 350, 550 e 700 mA. In Tabella 5 i dati rilevati.

**Tabella 5** Flussi rilevati al gonio dei Chromalit con camera di miscelazione Cerflex.

	Corrente (mA)	Flusso gonio (lm)	Potenza (W)	lm/W
<b>CL 830</b>	350	563.15	5.85	96.26
	550	845.44	9.38	90.13
	700	1042.26	12.10	86.14
<b>CL 930</b>	350	464.66	5.84	79.57
	550	696.91	9.39	74.22
	700	858.68	12.11	70.91

## 16 Dipendenza del flusso luminoso dalla corrente di pilotaggio

Una seconda serie di misurazioni è stata effettuata per valutare il rapporto tra flusso emesso e corrente di pilotaggio. I test sono stati effettuati utilizzando la sfera integratrice (diametro 2 m) in dotazione al Laboratorio Luce – Politecnico di Milano.



**Figura 101 – Sfera integratrice per le misurazioni dei flussi in funzione delle correnti di pilotaggio.**

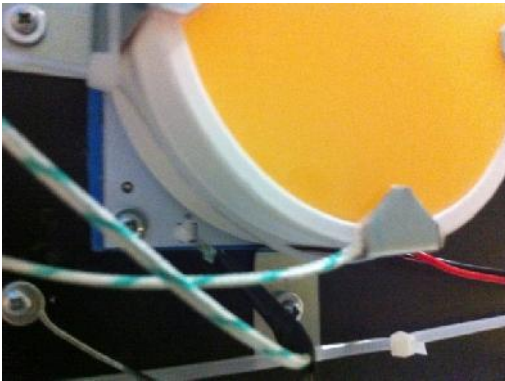
Per questa misura è stata impiegata la camera di miscelazione ceramica (CERFLEX) in modo da poter esplorare un intervallo di correnti ampio, fino a 700 mA, senza correre il rischio di deformare la camera di miscelazione plastica del demo kit Intematix, normalmente impiegata con modeste correnti di pilotaggio dei LED.

Per la dissipazione termica è stato impiegato un dissipatore con resistenza termica pari a  $0.48 \text{ }^\circ\text{C/W}$ , in modo tale che l'emissione dei LED blu fosse poco influenzata dalla temperatura di giunzione. Per verifica, durante la prova è stata monitorata la temperatura nel test point della scheda LED, registrando un valore massimo di temperatura pari a  $33^\circ\text{C}$ .

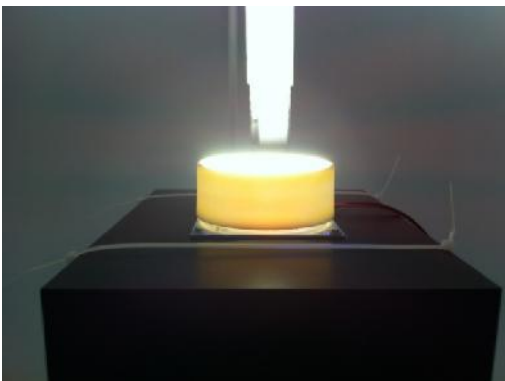


Camera di miscelazione Cerflex con LED blu.

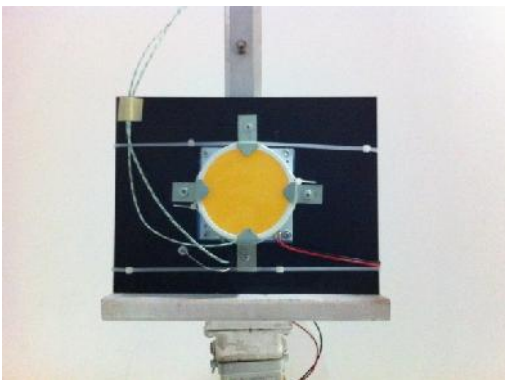




Posizionamento delle termocoppie per la misurazione dei parametri termici.



Camera di miscelazione Cerflex usata per la misurazione dei fosfori remoti Intematix.



Posizionamento della camera di miscelazione Cerflex all'interno della sfera integratrice del Laboratorio Luce.

Le correnti nominali impiegate sono comprese in un intervallo tra 50 mA e 700 mA, con incremento di 50 mA: per il raggiungimento del regime termico dopo la variazione della corrente è stato atteso un intervallo di tempo pari a 20 min.

Per quanto riguarda i flussi del sistema costituito dalla camera di miscelazione e dai LED BLU, i valori misurati da integrazione del solido fotometrico, sono riportati nella Tabella 6 per tre differenti correnti di alimentazione: 350 mA, 550 mA, 700 mA.

**Tabella 6 – Flussi misurati da integrazione relativi ai LED blu con camera Cerflex**

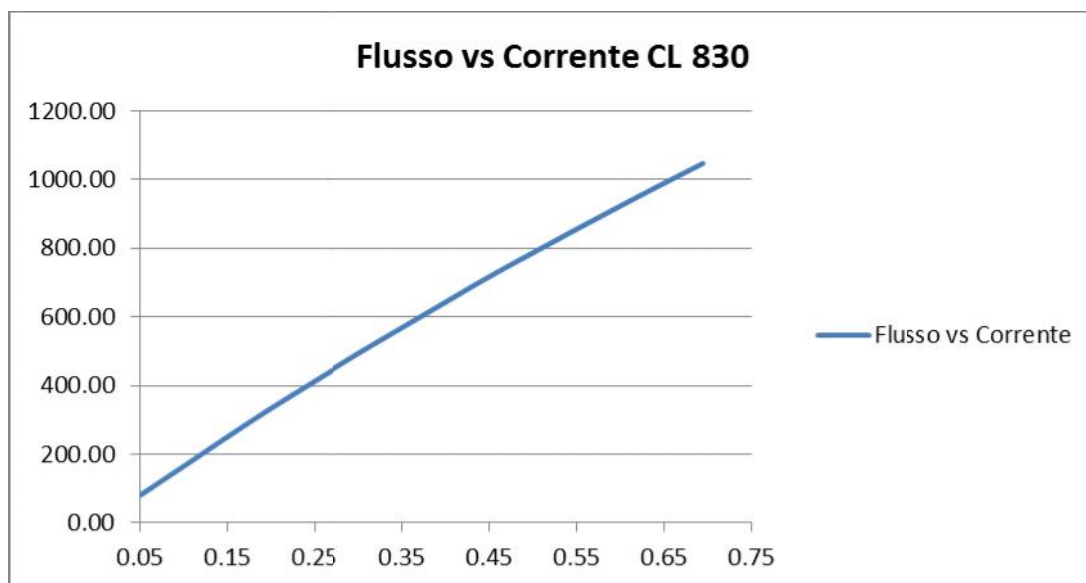
	<b>Corrente (mA)</b>	<b>Flusso LED blu (lm)</b>	<b>Potenza elettrica (W)</b>
<b>LED BLU</b>	350	65.79	5.84
	550	99.46	9.39
	700	123.45	12.11

Le misure in Sfera della camera Cerflex con sono state effettuate utilizzando due tipologie di fosfori remoti Chromalit: CL 830 e il CL930. I risultati sono riportati alla Tabella 7 e alla Tabella 8.

**Tabella 7 – Misurazione del flusso luminoso e potenza elettrica assorbita per il sistema costituito dalla camera Cerflex e fosforo CL830 (sfera)**

<b>Cerflex CL830</b>			
<b>LED Current (A)</b>	<b>LED Power (W)</b>	<b>Flusso (lm)</b>	<b>Efficienza lm/W</b>
0.050	0.80	79.94	100.69
0.100	1.61	165.40	102.61
0.149	2.42	249.79	102.85
0.197	3.25	330.06	101.91
0.247	4.09	409.10	100.02
0.296	4.94	486.41	98.58
0.347	5.81	563.15	96.77
0.400	6.75	642.37	95.21
0.445	7.55	709.63	94.08
0.495	8.43	779.87	92.57
0.545	9.31	849.04	91.16
0.595	10.20	916.73	89.79
0.644	11.09	982.28	88.53
0.694	12.00	1047.34	87.28

Nei due grafici successivi sono riportati i valori del flusso (Figura 102 e Figura 104) e dell’efficienza (Figura 103 e Figura 105) in funzione della corrente di pilotaggio per i due differenti fosfori considerati.



**Figura 102 Flusso vs corrente – Camera Cerflex e fosforo CL830**

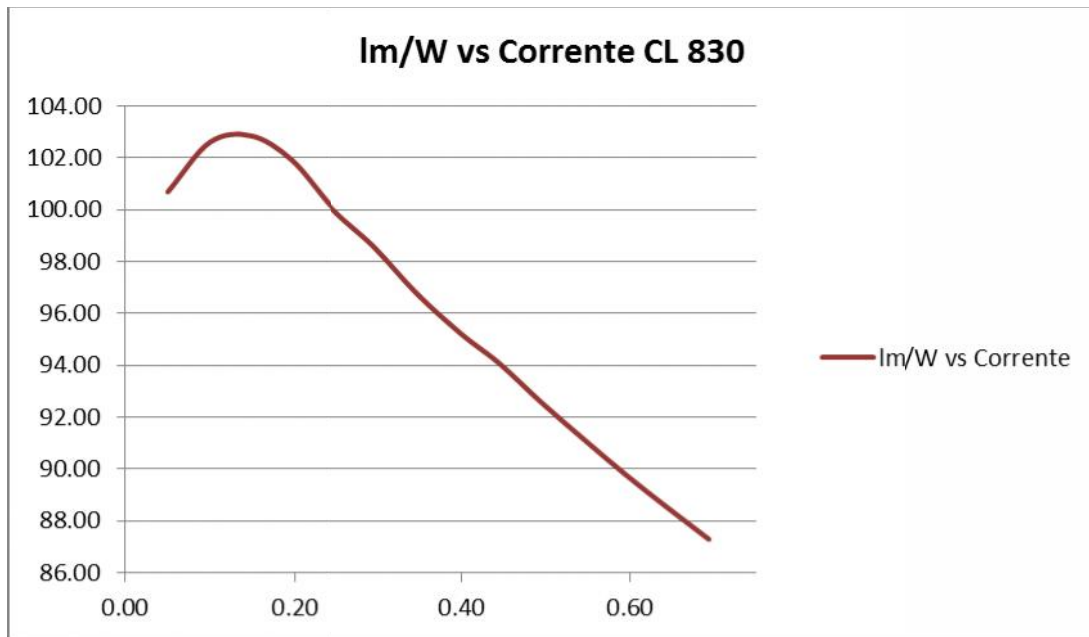


Figura 103 Efficienza luminosa (lm/W) vs corrente – Camera Cerflex e fosforo CL830

Tabella 8 – Misurazione del flusso luminoso e potenza elettrica assorbita per il sistema costituito dalla camera Cerflex e fosforo CL930 (sfera)

Cerflex CL930			
LED Current (A)	LED Power (W)	Flusso (lm)	Efficienza lm/W
0.050	0.80	66.43	83.56
0.099	1.60	137.05	85.72
0.149	2.43	206.16	84.78
0.198	3.25	272.47	83.60
0.247	4.09	337.66	82.40
0.297	4.95	401.70	81.04
0.347	5.82	464.66	79.75
0.396	6.68	525.07	78.55
0.445	7.55	584.57	77.46
0.495	8.43	642.51	76.22
0.545	9.32	699.87	75.05
0.595	10.21	755.66	73.92
0.644	11.11	810.14	72.97
0.694	12.01	863.96	71.96

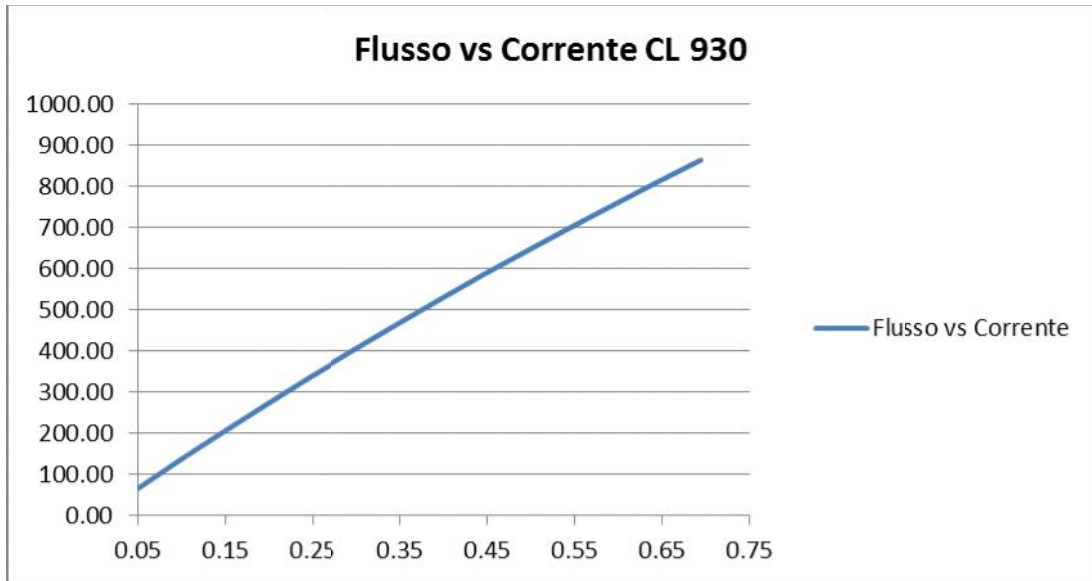


Figura 104 Flusso vs corrente – Camera Cerflex e fosforo CL930

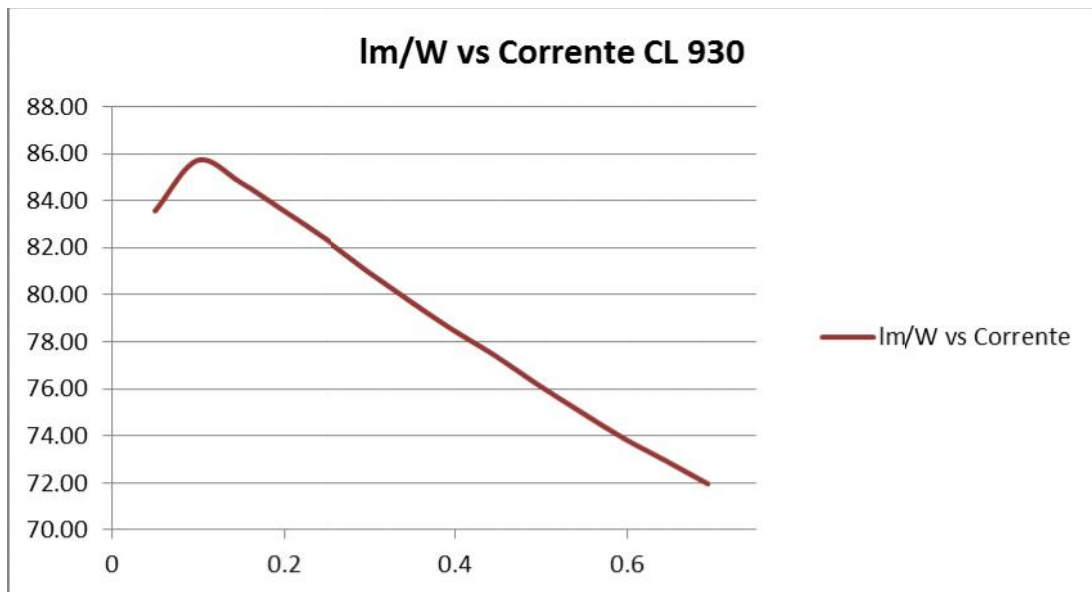


Figura 105 Efficienza luminosa (lm/W) vs corrente – Camera Cerflex e fosforo CL930

Confrontando i valori di efficienza nei casi del Chromalit CL-830 e CL-930 (Figura 106) si nota una differenza di circa il 15% che rimane sostanzialmente invariata per tutte le correnti di pilotaggio (da 50 a 700mA).

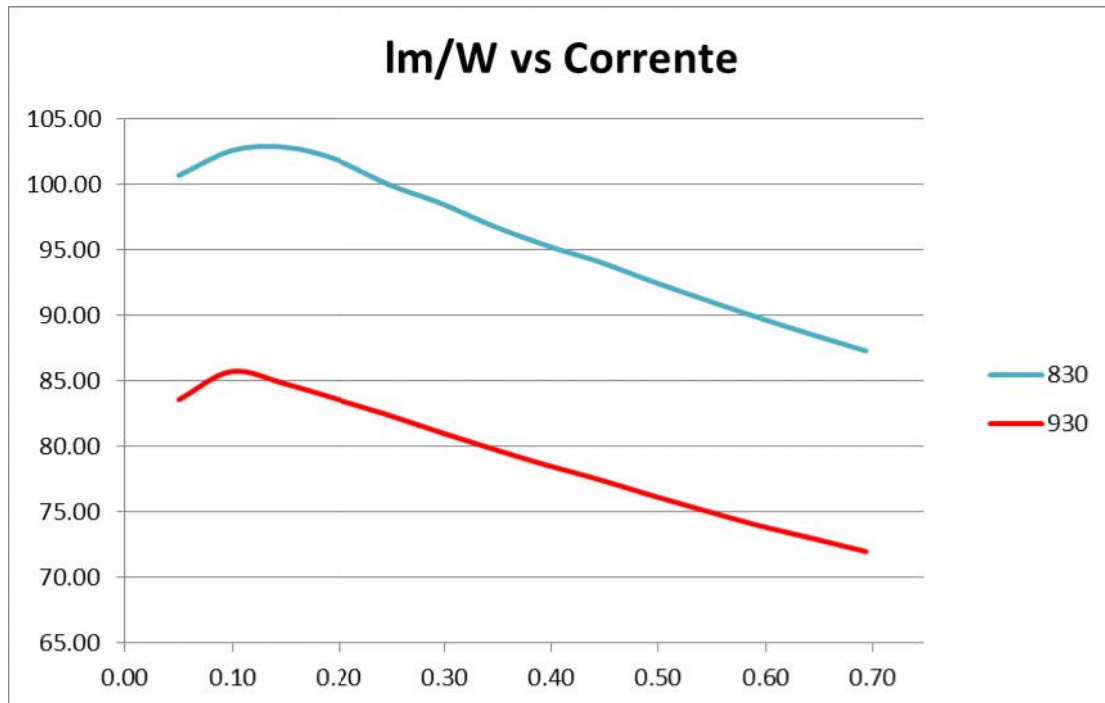


Figura 106 Confronto delle efficienze tra CL830 e CL930

## 17 Misure spettrali effettuate

Contestualmente alle misurazioni dei flussi luminosi, in sfera integratrice sono state effettuate anche misurazioni spettrali. Lo strumento impiegato per la misura delle caratteristiche spettrali delle lampade e per la valutazione è uno SpectraScan PR 701s .

Le misurazioni spettrali con camera Cerflex e fosfori CL830 e CL930 sono state eseguite, così come per le misurazione dei flussi, con correnti di alimentazione variabile a passi di 50 mA a partire da 50 mA fino a 550 mA. Di seguito le distribuzioni spettrali relative al Chromalit 830 (Figura 107) e Chromalit 930 (Figura 108).

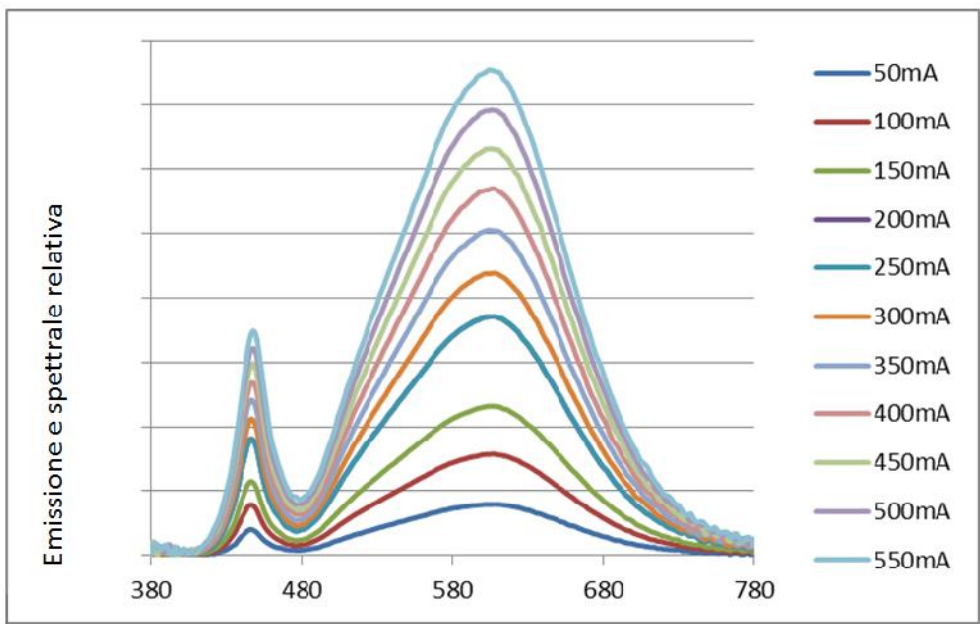


Figura 107 Spettri di emissione Chromalit CL-830 in funzione della corrente di alimentazione

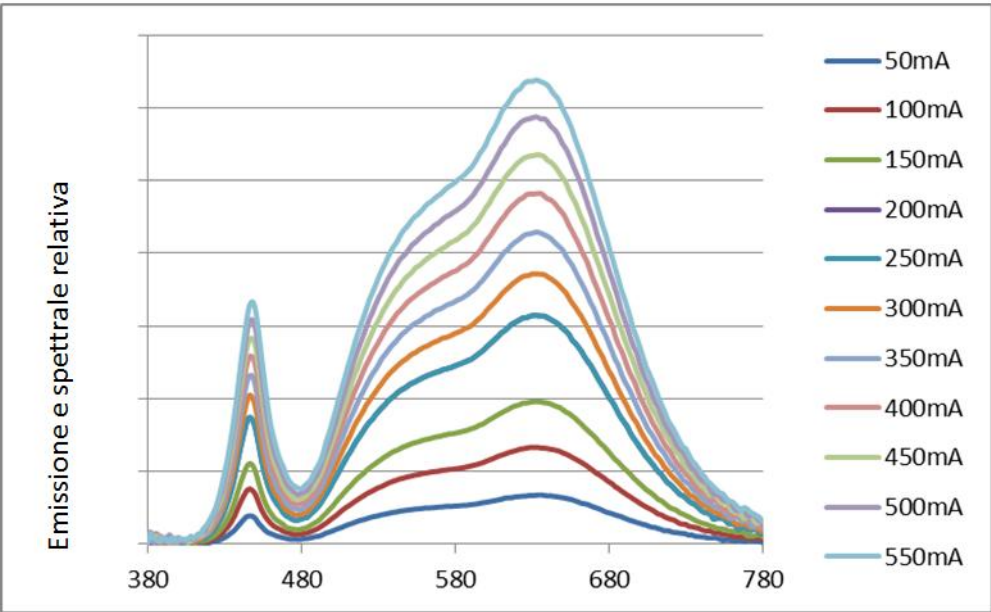
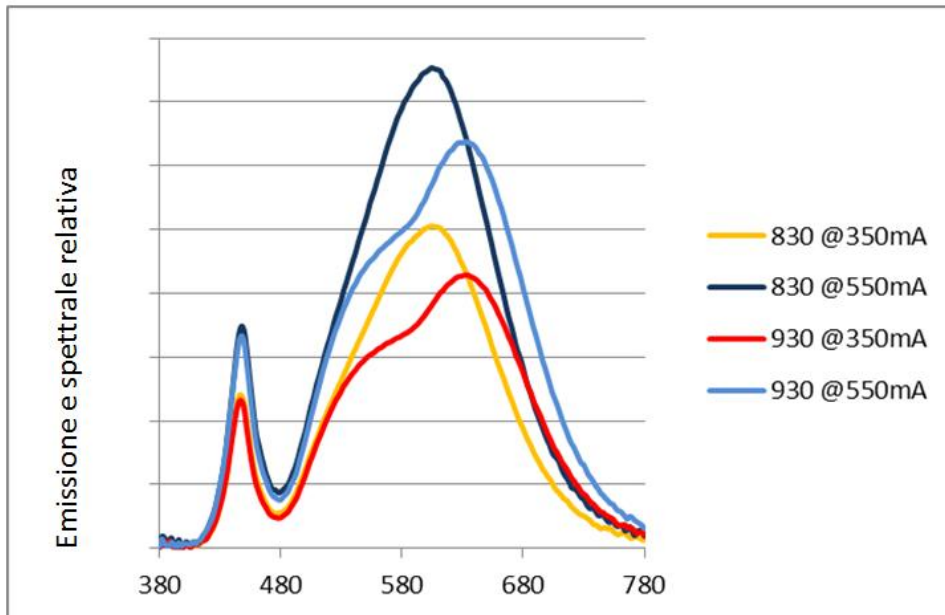


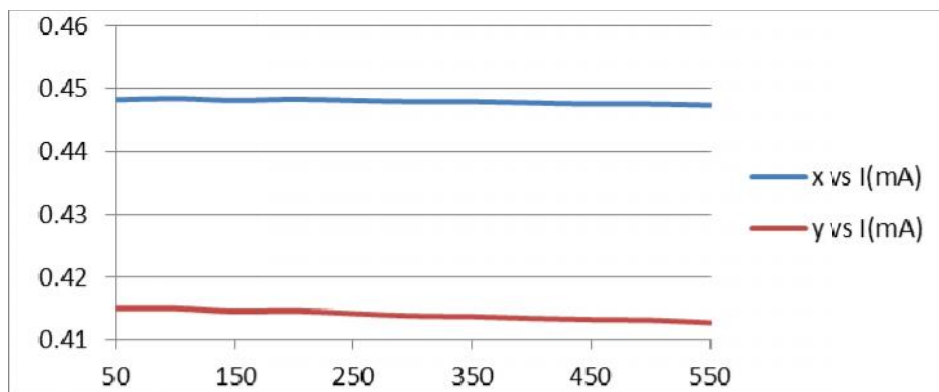
Figura 108 Spettri di emissione Chromalit CL-930 in funzione della corrente di alimentazione

Il confronto tra le distribuzioni spettrali relative al Chromalit CL-830 e CL-930, per due diversi valori della corrente di alimentazione (350 e 550 mA), è riportato alla Figura 109 : dall’esame della figura si individuano le caratteristiche curve di emissione con due differenti tipi di fosforo utilizzate nella versione CL930.

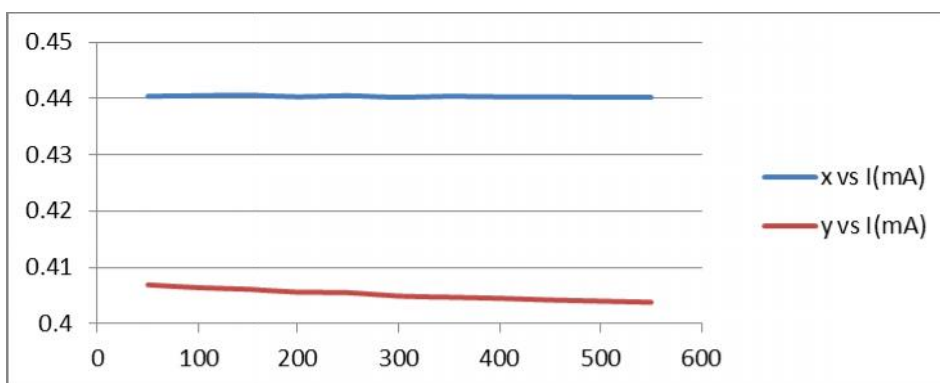


**Figura 109 Spettro di emissione CL830 e CL930 a 350mA e 550mA**

Per diversi valori delle correnti di alimentazione è stata verificata anche la stabilità delle coordinate cromatiche x e y dello spazio CIE 1931 e gli andamenti sono riportati alla Figura 110 e alla Figura 111. Dall'esame dei risultati ottenuti non si notano sostanziali variazioni nel valore di x mentre si ha una lieve diminuzione del valore y al crescere della corrente di alimentazione.



**Figura 110 Coordinate cromatiche vs corrente – CL830**



**Figura 111 Coordinate cromatiche vs corrente – CL930**

Le misurazioni dello spettro sono state eseguite per tutti i campioni di Chromalit a disposizione anche con la camera di miscelazione fornita nel kit Intematix. Di seguito i grafici relativi alla emissione spettrale dei campioni testati, divisi per tipologia e indice di resa cromatica.

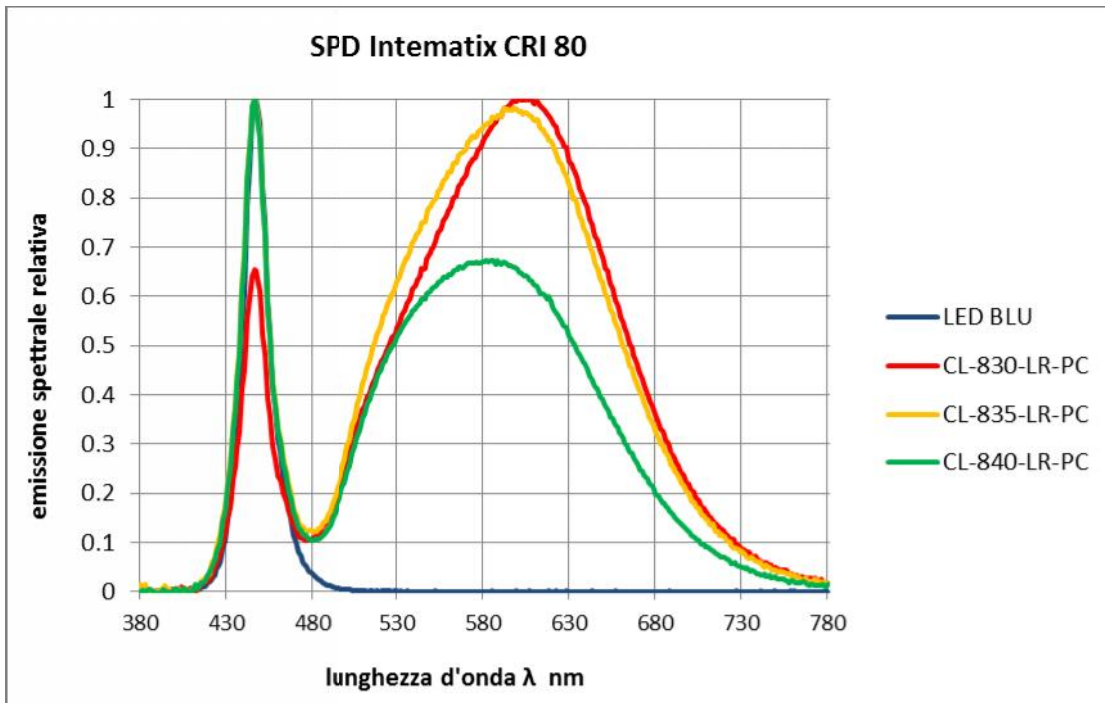


Figura 112 Emissione spettrale Chromalit con CRI Ra= 80

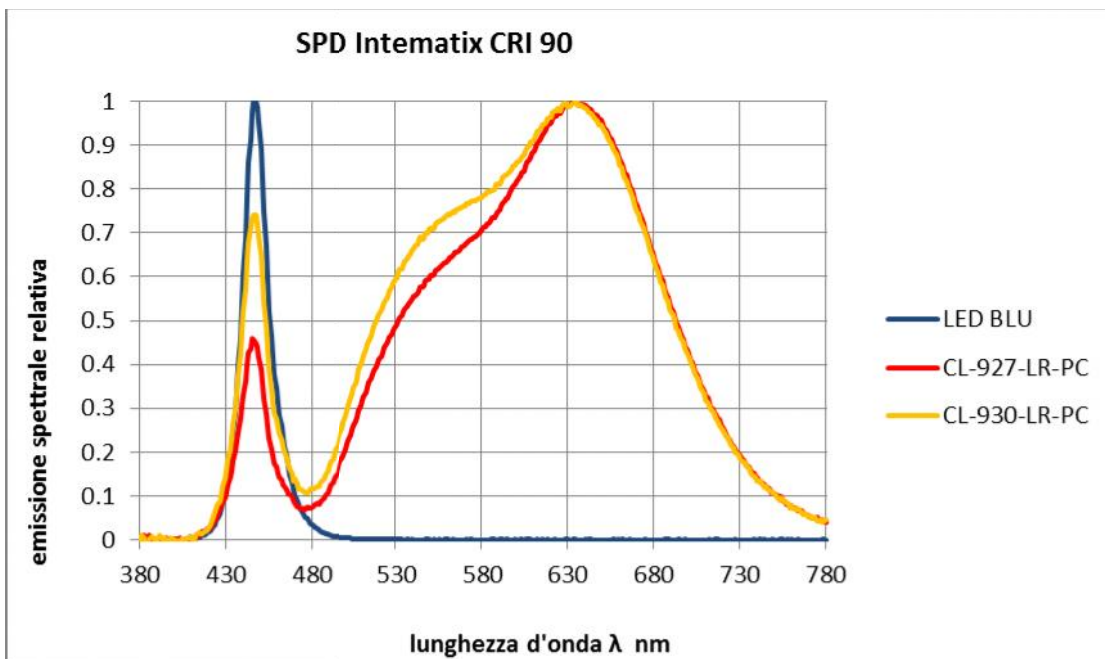


Figura 113 Emissione spettrale Chromalit con CRI Ra= 90



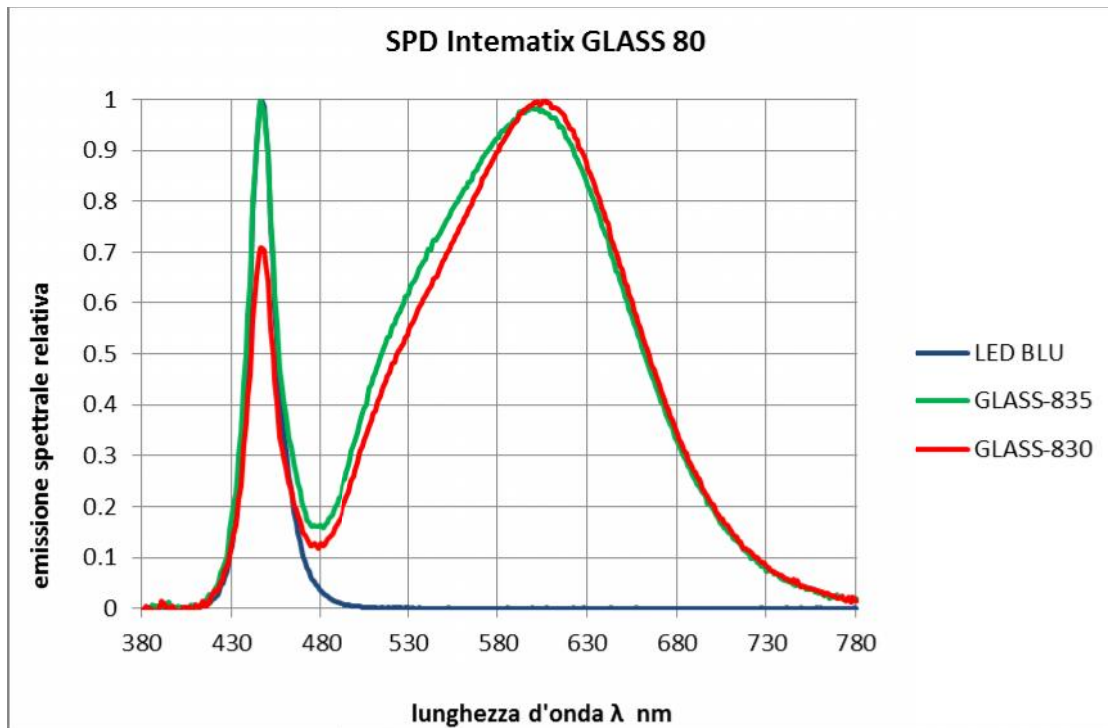


Figura 114 Emissione spettrale Chromalit in vetro con CRI Ra= 80

## 18 Misura della resa cromatica

Sulla base degli spettri misurati sono stati calcolati una serie di indici che caratterizzano cromaticamente (soprattutto in termini di resa dei colori) la luce emessa dai fosfori remoti Intematix. La Tabella 9 evidenzia i valori degli indici speciali di resa cromatica  $R_i$  e il valore dell'indice  $R_a$  per tutti gli spettri misurati.

**Tabella 9 Indici di resa cromatica dei fosfori Intematix**

	CL-927-LR-PC	CL-930-LR-PC	CL-830-LR-PC	CL-835-LR-PC	CL-840-LR-PC	GLASS-835	GLASS-830
CCT [K]	2685	3062	2982	3408	4071	3432	3046
R1	91,5	91,6	77,4	77,5	77	80,6	79,1
R2	90,8	90,4	85,3	83,7	81,6	86,7	86,7
R3	87	86,1	91,7	87,5	83,5	90,5	92,5
R4	90	89	77,8	77,9	78	80,7	79,2
R5	88,8	89,1	76	76,1	76	79,8	78
R6	86	85	79,2	76,1	73,2	80,9	81,3
R7	91,7	90,6	84,3	84,2	84	85,2	84,4
R8	87,3	88,4	61,3	64,1	66,6	66,4	62,5
R9	69,7	72,2	8,8	9,8	8,7	17,1	11,7
R10	76,3	75,3	65,4	60,5	55,2	67,8	68,3
R11	89,7	88,7	74,5	74,6	75,2	78,6	76,7
R12	69,4	68,6	58	53,3	48,9	61,1	61,2
R13	90,7	90,6	78,4	78,1	77,2	81,5	80,3
R14	91,5	91,2	94,9	92,4	90,3	94,3	95,3
R15	90,3	91,3	72,2	73,4	73,5	76,5	73,9
Ra	89,15	88,77	79,13	78,38	77,5	81,36	80,46

I dati relativi agli indici speciali di resa cromatica sono rappresentati nel diagramma a bersaglio della Figura 114.

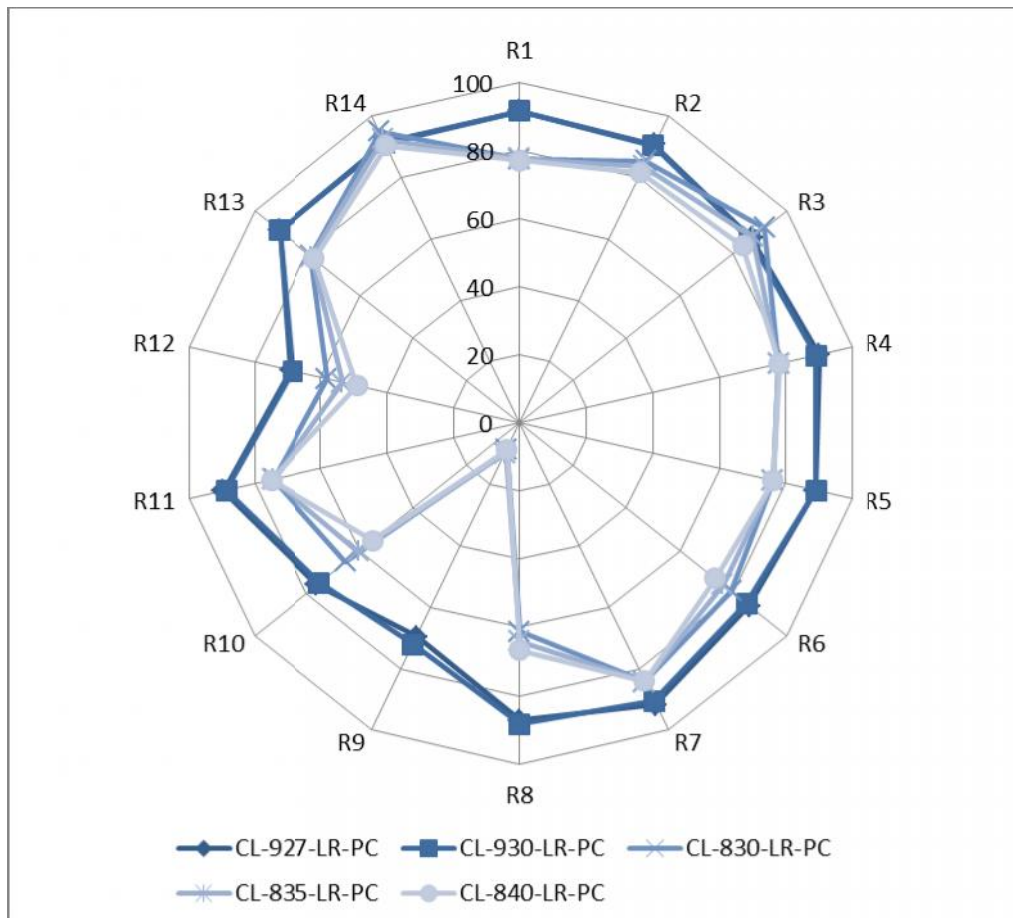


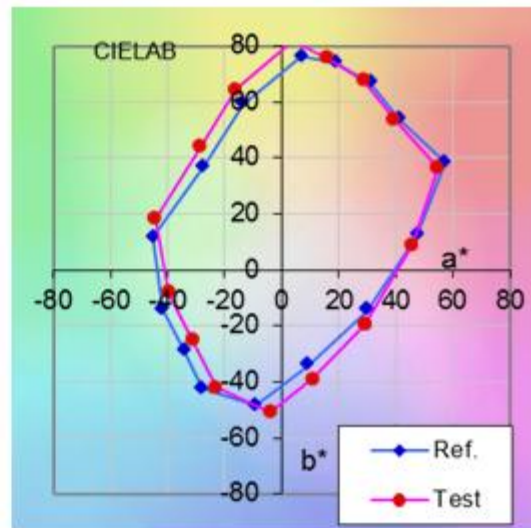
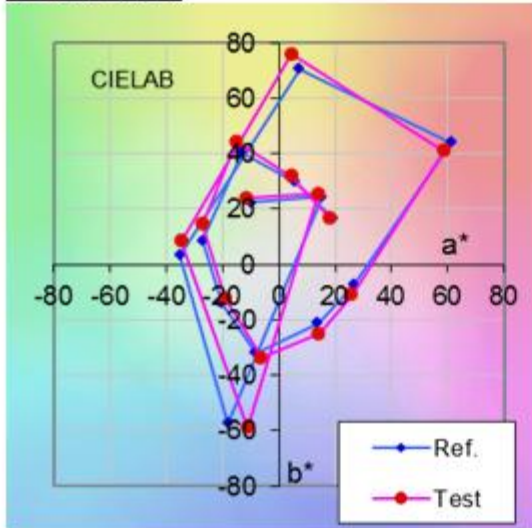
Figura 115 Indici di resa cromatica dei fosfori remoti Intematix

C'è una sostanziale differenza in termini di indici di resa cromatica tra i fosfori della serie 830 e quelli della serie 930. La differenza maggiore si nota soprattutto in corrispondenza al campione R<sub>9</sub>. Anche il campione R<sub>12</sub> presenta delle differenze significative al variare del fosforo esaminato.

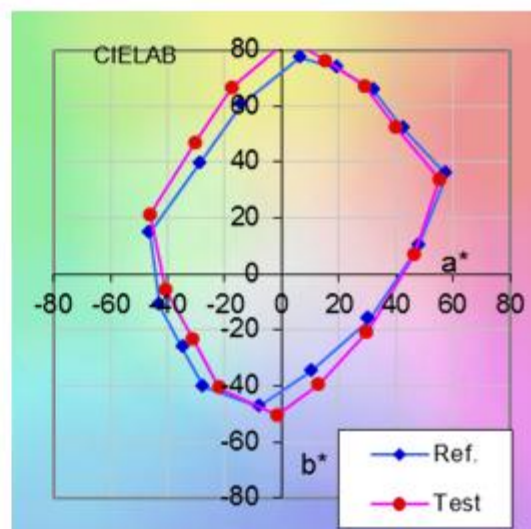
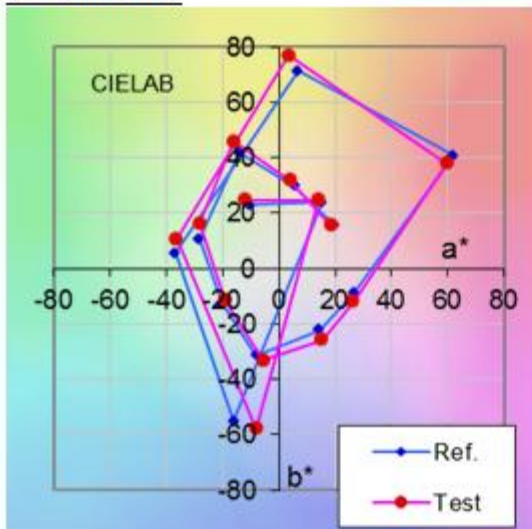
Un'analisi più approfondita degli scostamenti cromatici può essere fatta analizzando le differenze cromatiche per i singoli campioni nello spazio colore CIELAB, quando quest'ultimi sono illuminati dalla sorgente di riferimento e quando sono illuminati dalla sorgente di test. In questo caso, oltre ai valori del CIE CRI, sono stati analizzati anche gli scostamenti relativi ai campioni cromatici del CQS.

Gli scostamenti maggiori si individuano, come già osservato, in corrispondenza dei campioni R<sub>9</sub> e R<sub>12</sub> (rosso e blu saturo).

CL-927-LR-PC



CL-930-LR-PC



CL-830-LR-PC

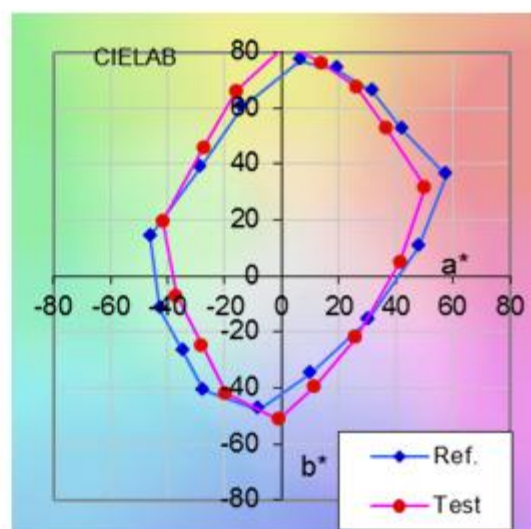
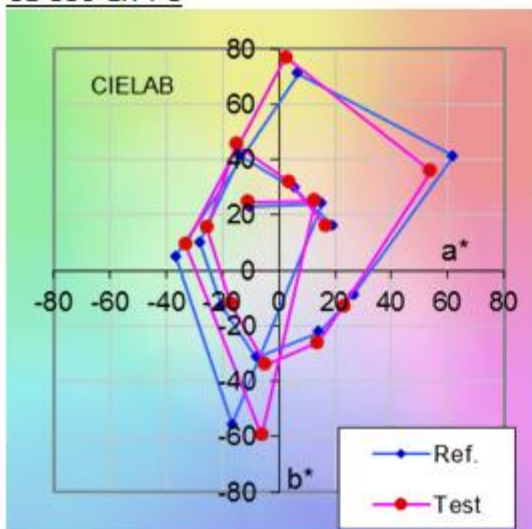


Figura 116 Gamut area nello spazio CIE Lab con i campioni cromatici dell'indice CIE-CRI e dell'indice CQS

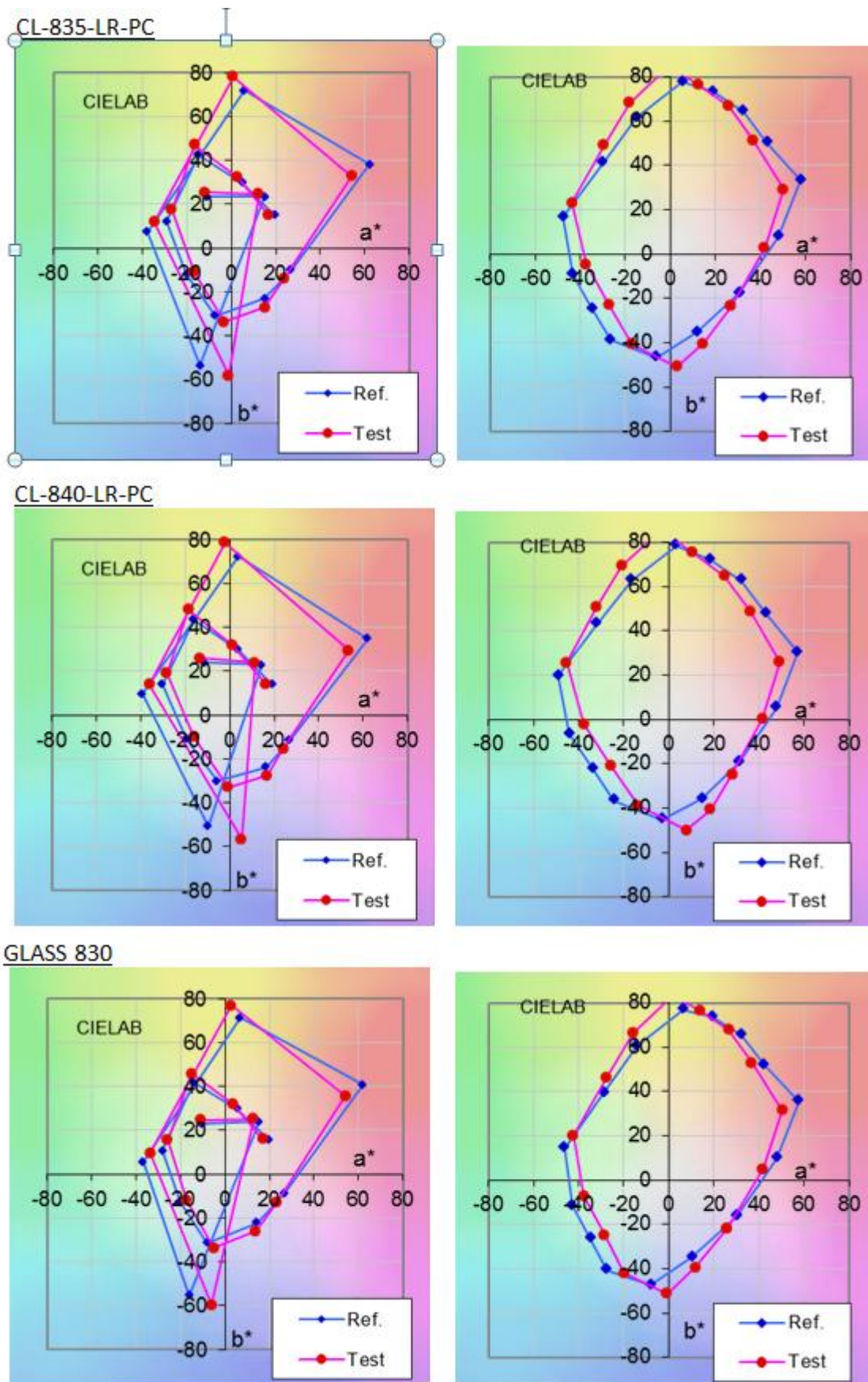


Figura 117 Gamut area nello spazio CIELab con i campioni cromatici dell'indice CIE-CRI e dell'indice CQS

GLASS 835

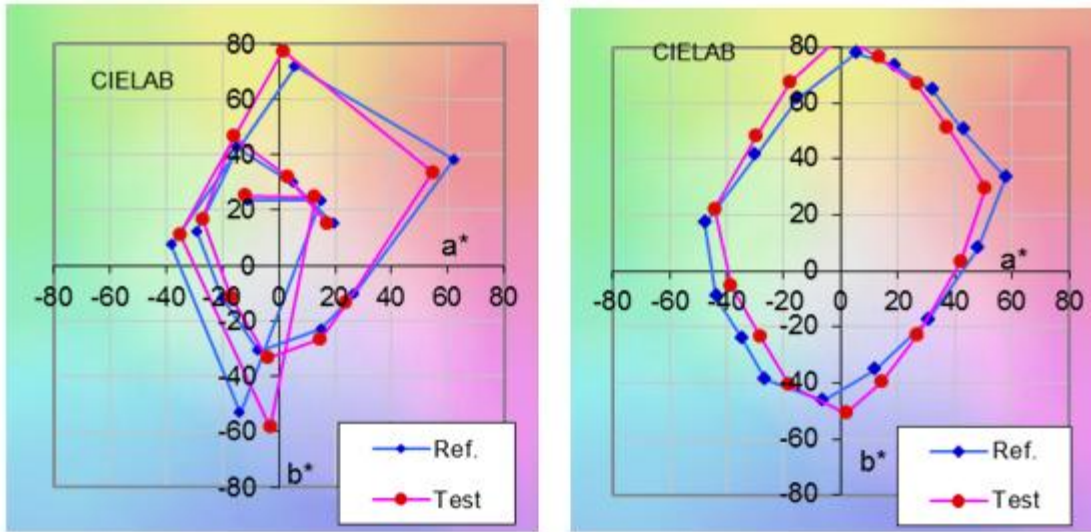
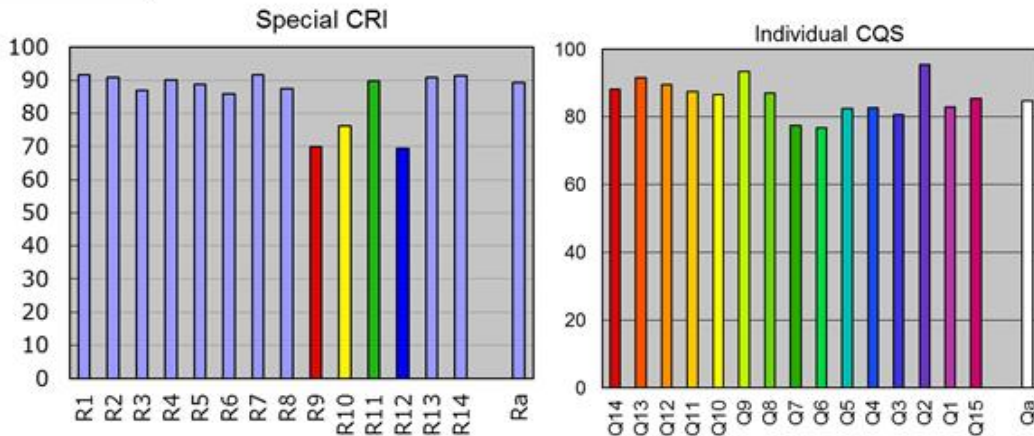


Figura 118 Gamut area nello spazio CIE Lab con i campioni cromatici dell'indice CIE-CRI e dell'indice CQS

Graficamente le differenze in termini di resa cromatica sono ancora più evidenti analizzando i grafici a barre relativi ai diversi fosfori remoti misurati.

CL-927-LR-PC



CL-930-LR-PC

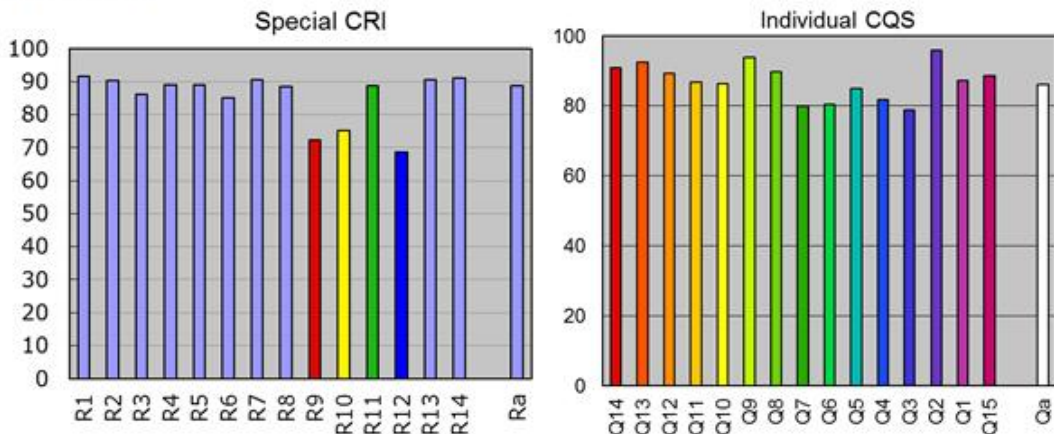
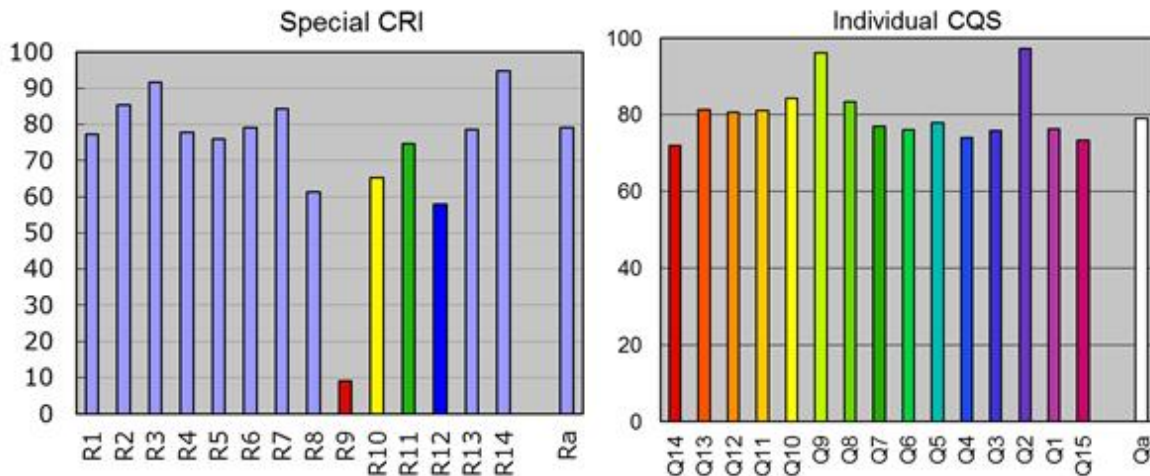
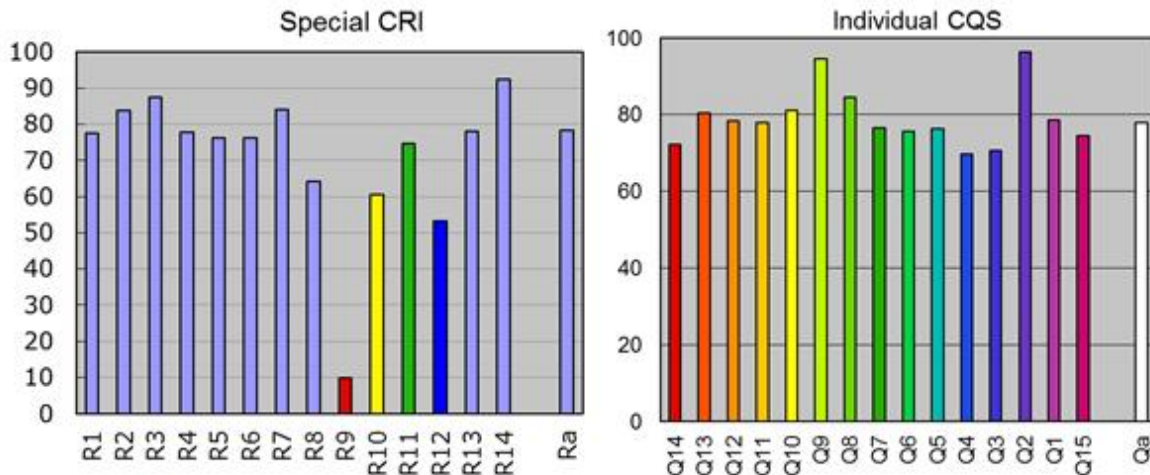


Figura 119 Dettaglio indici speciali CIE-CRI e CQS per i fosfori CL-927-LR-PC e CL-930-LR-PC

CL-830-LR-PC



CL-835-LR-PC



CL-840-LR-PC

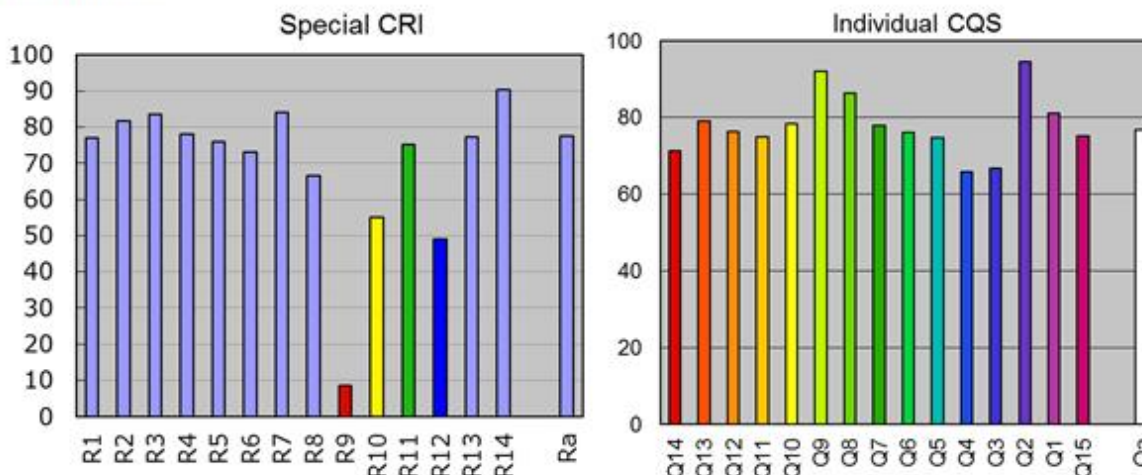
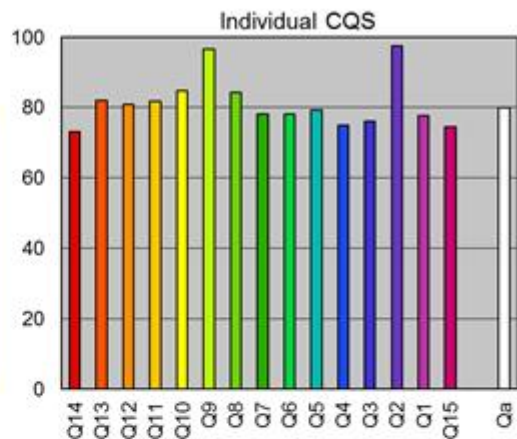
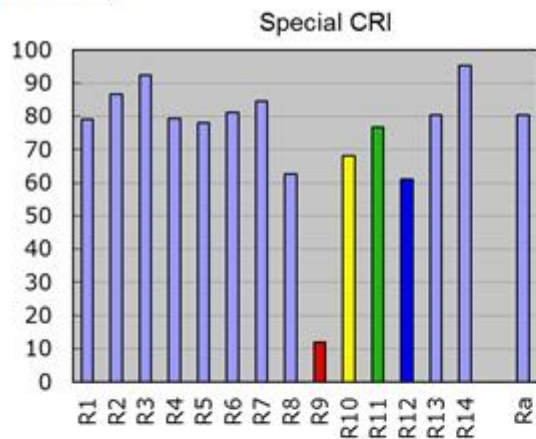


Figura 120 Dettaglio indici speciali CIE-CRI e CQS per i fosfori CL-830-LR-PC e CL-835-LR-PC CL-840-LR-PC

**GLASS 830**



**GLASS 835**

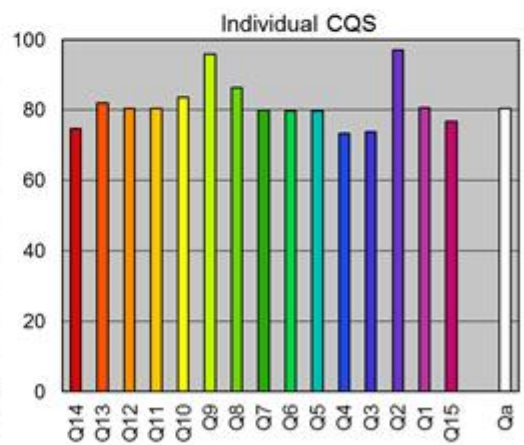
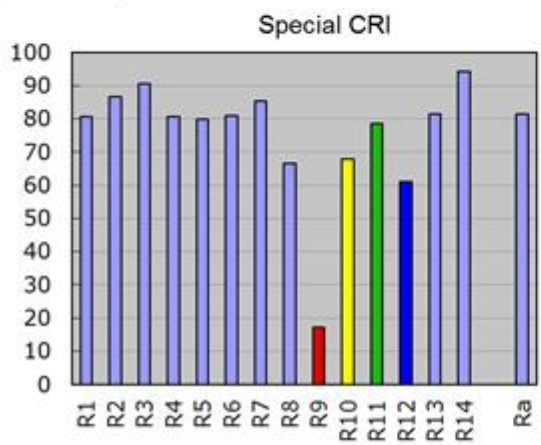


Figura 121 Dettaglio indici speciali CIE-CRI e CQS per i fosfori GLASS 830 e GLASS 835

## 19 Confronti fra tecnologie: misure

Come anticipato nei paragrafi precedenti, uno degli obiettivi della ricerca è quello di fare un confronto tra tecnologia a fosfori remoti e altre tipologie di prodotti con un medesimo ambito di utilizzo. In fase di benchmarking sono state individuate possibili soluzioni alternative ai fosfori remoti e tra questa la più significativa da un punto di vista prestazionale è rappresentata dalla serie LMH2 di light engines prodotti da CREE.

Per questa ragione, sono state effettuate alcune misure di laboratorio su una serie di moduli LED:

- LMH020-1250-30G9-00000TW
- LMH020-1250-40G9-00000TW
- LMH020-2000-30G9-00000TW
- LMH020-3000-30G9-00000TW



Figura 122 – Serie LMH2 CREE

I moduli LMH2 sono basati sulla tecnologia “Truewhite” della CREE. Come visto in un paragrafo precedente, con questa tecnologia la luce bianca viene ottenuta attraverso il mix di due tipi di sorgenti: LED con emissione spettrale spostata nella regione verde e LED rossi o ambra. La necessità di usare due tecnologie complica significativamente il sistema da un punto di vista elettronico.

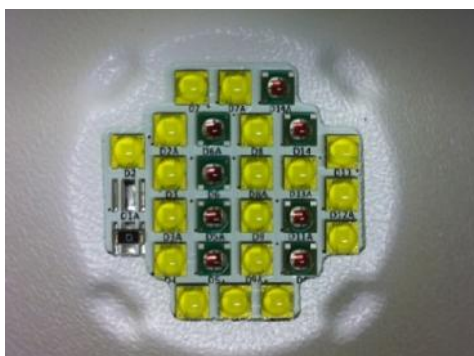


Figura 123 – Dettaglio del modulo LMH020-3000

I moduli CREE sono stati misurati sia con goniofotometro sia in sfera integratrice a correnti differenti: 350 mA e alla corrente tipica di funzionamento definita dal produttore (440 mA per i moduli da 1250 lm e 900 mA per i moduli da 2000 e 3000 lm).

I risultati ottenuti dalle misurazioni sono sintetizzati alla Tabella 10, che riporta per ogni dispositivo misurato il flusso luminoso emesso, la potenza elettrica assorbita e il rapporto lm/W.

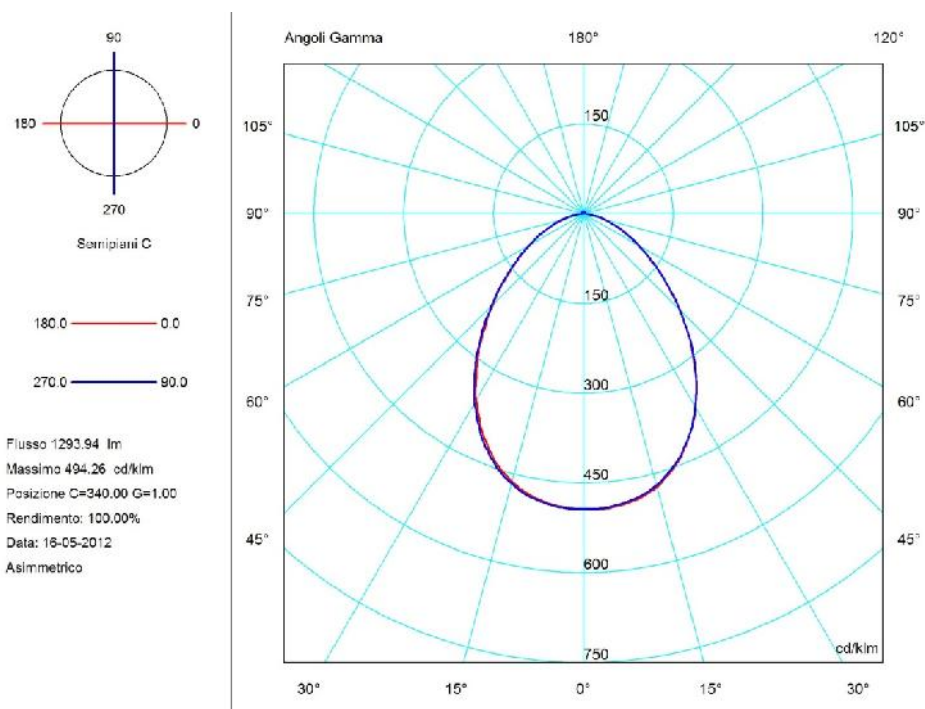


**Tabella 10 Risultati delle misurazioni dei moduli CREE**

	Corrente (mA)	Flusso (lm)	Potenza elettrica Assorbita (W)	Efficienza lm/W
LMH020-1250-30G9	440*	1293,94	13,323	97,12
LMH020-1250-30G9	350	1062,42	10,418	101,98
LMH020-1250-40G9	440*	1187,24	13,133	90,40
LMH020-1250-40G9	350	984,71	10,271	95,87
LMH020-2000-30G9	900*	2000,81	21,579	92,72
LMH020-2000-30G9	350	901,99	7,823	115,30
LMH020-3000-30G9	900*	2804,86	30,445	92,13
LMH020-3000-30G9	350	1274,73	11,083	115,02

\*Correnti reali di funzionamento

Di seguito (Figura 124) viene riportato il diagramma polare di uno dei moduli misurati. Tutti i modelli presentano in linea di massima la stessa distribuzione fotometrica.



**Figura 124 – Diagramma polare del modulo LMH2-30G9**

Rispetto all'emissione dei campioni di fosfori Intematix si nota un angolo di apertura più stretto (semiapertura di 41,6°+42,8° nel caso di CREE rispetto a 57°+57° nel caso di Intematix).

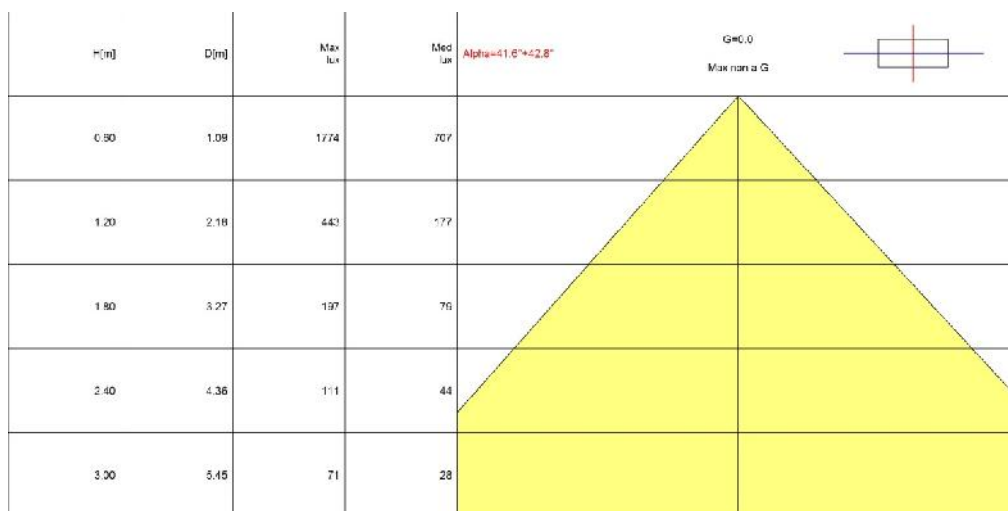


Figura 125 – Angolo di apertura del modulo CREE - LMH2-30G9

Alle correnti di funzionamento caratteristiche dei moduli CREE (440 mA o 900 mA a seconda dei modelli) le efficienze dei vari modelli (esclusi alimentatori) sono superiori ai 90 lm/W. In caso di pilotaggio a correnti inferiori (350 mA) si raggiungono anche i 115 lm/W.

Nel caso del fosforo remoto CL930 il valore di efficienza luminosa, alla corrente di 350 mA, si attesta attorno a 76 lm/W, mentre il valore medio per la soluzione ibrida raggiunge i 107 lm/W, alla stessa intensità di corrente. In ogni caso, anche a bassissime correnti di alimentazione, l'efficienza massima per il fosforo CL930 raggiunge il valore di 85 lm/W.

Tabella 11 - Efficienza Intematix CL930

Intematix CL-930			
LED Current	Potenza elettrica		Efficienza
	Assorbita (LED)	Flusso	
(A)	(W)	(lm)	lm/W
0.050	0.80	66.43	83.56
0.099	1.60	137.05	85.72
0.149	2.43	206.16	84.78
0.198	3.25	272.47	83.60
0.247	4.09	337.66	82.40
0.297	4.95	401.70	81.04
0.347	5.82	464.66	79.75
0.396	6.68	525.07	78.55
0.445	7.55	584.57	77.46
0.495	8.43	642.51	76.22
0.545	9.32	699.87	75.05
0.595	10.21	755.66	73.92
0.644	11.11	810.14	72.97
0.694	12.01	863.96	71.96

Lo stesso confronto è possibile con i fosfori remoti con indice di resa cromatica più basso (CL830).

Tabella 12 – Efficienza Intematix CL830

Intematix CL-830			
LED Current	Potenza elettrica Assorbita (LED)	Flusso	Efficienza
(A)	(W)	(lm)	lm/W
0.050	0.80	79.94	100.69
0.100	1.61	165.40	102.61
0.149	2.42	249.79	102.85
0.197	3.25	330.06	101.91
0.247	4.09	409.10	100.02
0.296	4.94	486.41	98.58
0.347	5.81	563.15	96.77
0.400	6.75	642.37	95.21
0.445	7.55	709.63	94.08
0.495	8.43	779.87	92.57
0.545	9.31	849.04	91.16
0.595	10.20	916.73	89.79
0.644	11.09	982.28	88.53
0.694	12.00	1047.34	87.28

In questo caso le efficienze della soluzione a fosfori remoti sono a livelli confrontabili con quelle dei moduli CREE e si attestano a valori vicini ai 95 lm/W (Tabella 12). Per quanto riguarda l'efficienza del modulo a fosfori remoti, si osserva che esiste una dipendenza dalle caratteristiche del LED blu, dove modelli differenti dello stesso produttore possono dare luogo a risultati significativamente differenti: nel passare dal Luxeon Rebel ES Color LXML-PR01-0425 al LXML-PR02-1100, si ottiene un aumento della potenza radiante spettrale di circa il 25%, alla corrente di alimentazione di 700 mA, con temperatura di giunzione di 25°C. Si passa infatti da 840 mW per il primo a 1120 mW per il secondo, a parità di ogni altra condizione di funzionamento.

Rimane quindi problematico definire una graduatoria di efficienza (lm/W) tra le diverse tecnologie esaminate sulla base di misurazioni condotte su semilavorati con caratteristiche costruttive profondamente diverse: risulta necessario considerare un nuovo importante parametro, il LER (luminous efficacy of optical radiation) che rappresenta la potenza ottica relativa dello spettro di emissione utile alla visione comparata con la potenza ottica totale emessa<sup>68</sup>.

$$LER = 683 \frac{lm \int_{380}^{780} P_{white}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{W \int_{380}^{780} P_{white}(\lambda) d\lambda}$$

Sono quindi state considerate le tre differenti tecnologie ad oggi presenti sul mercato e si è tentato di mettere in relazione le caratteristiche di qualità cromatica (CRI-CQS-Duv) delle diverse soluzioni, con il parametro di efficacia luminosa della radiazione ottica (LER) definito in precedenza.

Tabella 13 Riepilogo delle caratteristiche di qualità cromatica e di efficacia luminosa (LER) per tre diverse tecnologie :ibrida- COB- Fosfori remoti

	MODULO IBRIDO 930	MODULO IBRIDO 940	COB WW	COB CW	FOSFORI REMOTI 830	FOSFORI REMOTI 930
CCT:	2981	3748	2673	5260	2899	2947

<b>Duv:</b>	0,003	0,004	0,000	0,004	0,002	0,000
<b>CRI Ra:</b>	92	91	97	91	78	89
<b>R(9-12):</b>	78	73	91	76	50	75
<b>R9:</b>	77	70	81	63	6	68
<b>CQS</b>	90	90	94	90	79	87
<b>LER (lm/W):</b>	<b>345</b>	<b>339</b>	<b>265</b>	<b>288</b>	<b>323</b>	<b>275</b>

Dall’esame dei risultati della Tabella 13, si osserva che il sistema che offre una maggiore efficacia in termini di LER è rappresentato dai moduli a tecnologia ibrida. Ciò significa che è la distribuzione della potenza emessa all’interno della banda del visibile, a parità di potenza ottica emessa, a determinare la maggiore quantità di flusso luminoso emesso. Il valore del LER è strettamente legato all’indice di resa cromatica: al crescere della resa cromatica il LER diminuisce in relazione al fatto che è necessario distribuire la potenza radiata su tutto lo spettro del visibile; ad esempio il passaggio da un valore del CRI da 80 a 90 nella tecnologia a fosfori remoti determina un decremento del LER da 323 a 275 lm/W.

La Figura 126 mostra le differenti distribuzioni spettrali delle soluzioni considerate; si individua chiaramente la differenza tra le tecnologie a conversione di fosfori (sia prossimali che remoti) e la tecnologia ibrida. Per ottenere alti indici di resa cromatica nel caso della tecnologia ibrida si utilizzano LED rossi che hanno una banda di emissione molto più stretta rispetto ai fosfori utilizzati nella tecnologia a conversione; essendo ai margini della curva di visibilità questo si traduce in una ottimizzazione dell’emissione spettrale con un conseguente vantaggio in termini di efficacia luminosa (lm/W).

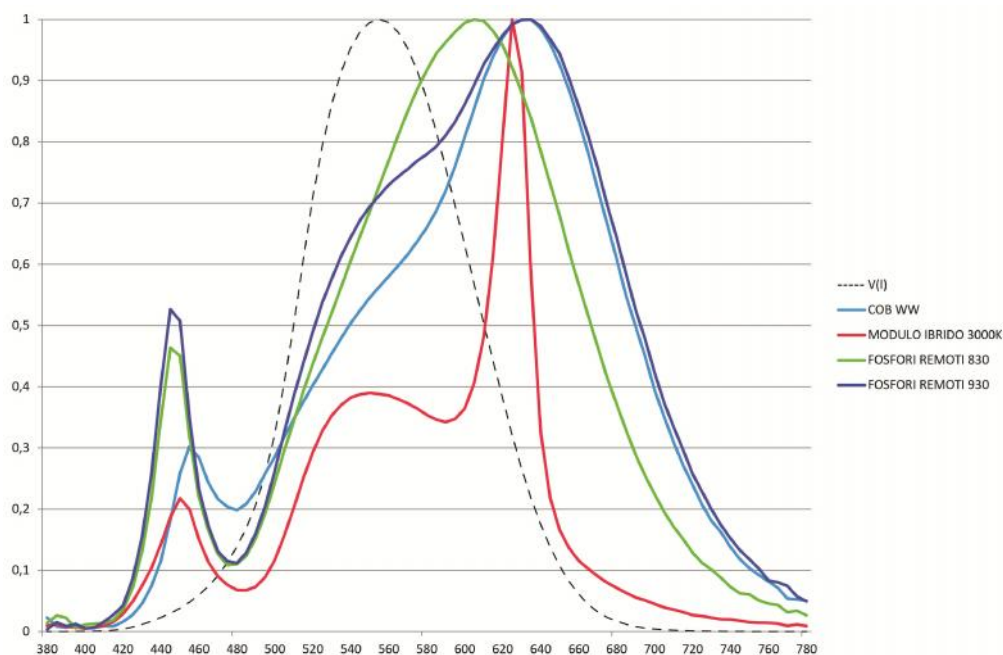


Figura 126 Distribuzioni spettrali delle diverse soluzioni messe a confronto

Sulla base degli spettri rilevati sono stati determinati gli indici di resa cromatica CRI (Tabella 15) e CQS (Tabella 14) per i moduli a tecnologia ibrida.

Tabella 14 – CQS dei moduli CREE

<b>LMH20-1250-3000K</b>	<b>LMH20-1250-3000K</b>	<b>LMH20-1250-4000K</b>	<b>LMH20-1250-4000K</b>	<b>LHM20-2000-3000K</b>	<b>LHM20-2000-3000K</b>	<b>LMH20-3000-3000K</b>	<b>LMH20-3000-3000K</b>
-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------

	440 mA	350 mA	440 mA	350 mA	900 mA	350 mA	900 mA	350 mA
Q14	94	93	93	93	94	86	93	87
Q13	94	94	96	95	94	93	92	92
Q12	94	93	94	94	93	91	90	90
Q11	92	91	91	91	90	89	87	87
Q10	90	90	90	91	88	89	88	89
Q9	91	91	93	93	90	91	90	91
Q8	96	96	95	95	94	94	95	95
Q7	86	86	90	90	83	84	85	85
Q6	85	85	89	88	81	82	82	82
Q5	89	89	87	86	86	86	85	85
Q4	88	88	81	81	85	86	84	86
Q3	85	85	82	82	83	83	82	84
Q2	96	95	97	97	96	95	97	95
Q1	89	88	91	91	87	82	89	83
Q15	91	90	92	91	90	83	90	85
Qa	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>88</b>	<b>87</b>	<b>88</b>	<b>87</b>

I valori dei singoli indici del CQS sono tutti superiori a 81, indipendentemente dal campione cromatico considerato e dalle caratteristiche del modulo, con scostamenti maggiori nella zona dei blu e con scostamenti molto ridotti nella zona dei rossi (Figura 127).

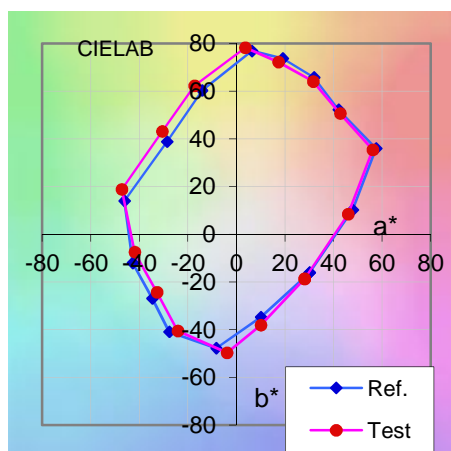


Figura 127 – Rappresentazione degli indici CQS per uno dei moduli CREE misurati.

Estremamente elevati sono anche i valori degli indici speciali del CIE-CRI, con il valore di R9 che, in condizioni di alimentazioni corrette, assume valori sempre superiori a 70.

Tabella 15 – CRI dei moduli CREE

	LMH20- 1250- 3000K	LMH20- 1250- 3000K	LMH20- 1250- 4000K	LMH20- 1250- 4000K	LHM20- 2000- 3000K	LHM20- 2000- 3000K	LMH20- 3000- 3000K	LMH20- 3000- 3000K
	440 mA	350 mA	440 mA	350 mA	900 mA	350 mA	900 mA	350 mA
R1	99	99	93	93	97	95	93	95
R2	93	93	91	91	90	90	87	89
R3	81	82	85	86	79	82	77	80

<b>R4</b>	92	93	93	93	91	92	91	92
<b>R5</b>	95	94	89	89	92	90	88	90
<b>R6</b>	91	91	87	87	87	88	81	87
<b>R7</b>	94	94	97	97	92	93	90	93
<b>R8</b>	94	92	91	90	93	82	93	85
<b>R9</b>	77	71	70	67	77	47	77	53
<b>R10</b>	75	75	73	74	71	70	64	68
<b>R11</b>	92	93	89	89	91	92	90	92
<b>R12</b>	69	68	60	59	64	62	57	61
<b>R13</b>	97	97	92	92	94	93	90	93
<b>R14</b>	86	87	90	90	85	87	85	86
<b>Ra</b>	<b>92</b>	<b>92</b>	<b>91</b>	<b>91</b>	<b>90</b>	<b>89</b>	<b>88</b>	<b>89</b>

Nella Figura 128 e Figura 129 viene fatto un confronto rispetto a due indici di resa cromatica CQS e CIE CRI tra i moduli CREE e i fosfori remoti Intematix a differenti temperature di colore e con diversa capacità di resa dei colori (serie CL830 e CL930). L'andamento è sostanzialmente simile nel caso del fosforo a più alta resa cromatica (CL930), mentre nel caso del CL830 i valori sono significativamente più bassi, soprattutto nella zona dei rossi.

Nella soluzione ibrida l'utilizzo di un picco di emissione più stretto nella zona dei rossi non comporta, contrariamente a quello che si potrebbe immaginare, una diminuzione della qualità cromatica. Nei grafici successivi vengono confrontati i valori dei singoli indici del CRI e del CQS relativi alle tecnologie esaminate. I fosfori remoti con minore indice di resa cromatica che hanno un valore del LER comparabile a quello delle soluzioni ibride presentano valori estremamente bassi degli indici parziali soprattutto nella zona dei rossi. Le soluzioni ibride sono invece perfettamente confrontabili in termini sia di CRI sia di CQS con le soluzioni a conversione dei fosfori ad elevati indici di resa cromatica.

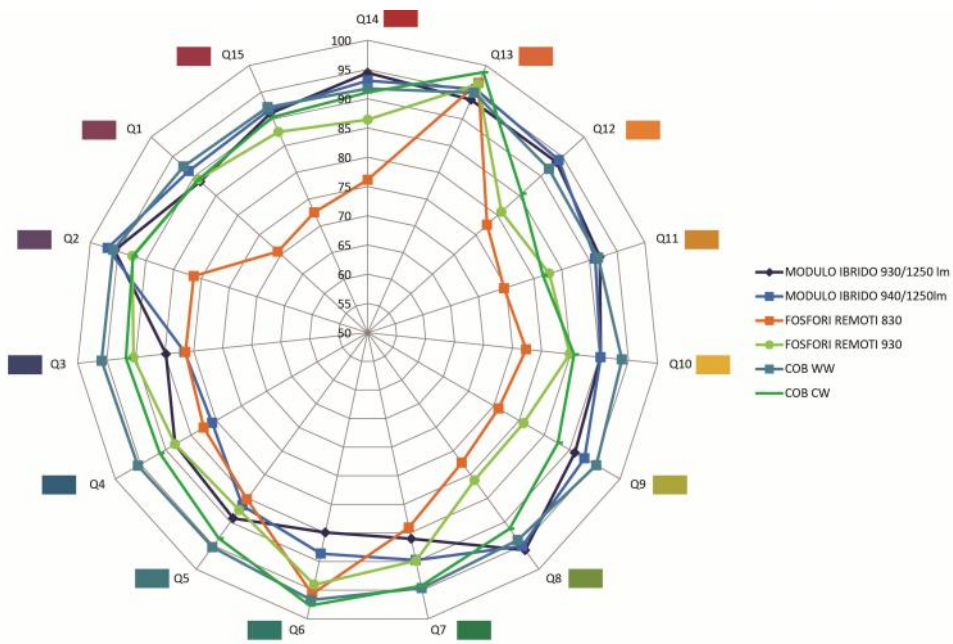


Figura 128 Confronto indici CQS tra Moduli CREE e fosfori Intematix CL830 e CL930

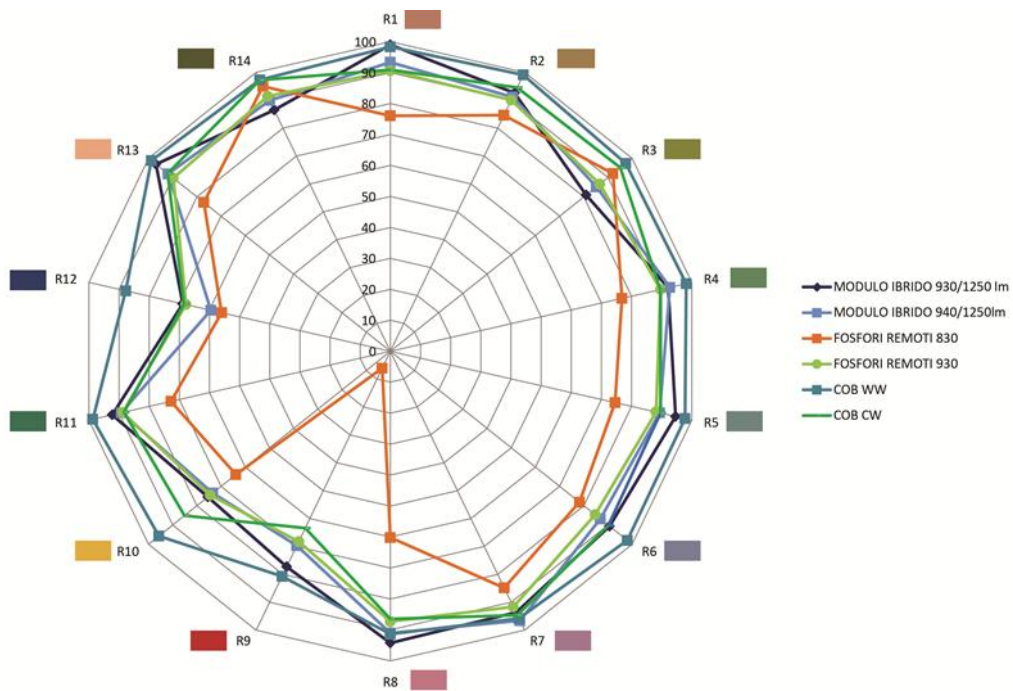


Figura 129 Confronto indici CRI tra Moduli CREE e fosfori Intematix CL830 e CL930

## 20 Conclusioni e considerazioni sulle diverse soluzioni tecnologiche

Sono state individuate tre differenti tecnologie per la generazione di luce bianca, con pacchetti di flusso luminoso consistente:

- COB/LLE
- Fosfori remoti
- Moduli a tecnologia ibrida (bianco a conversioni di fosfori e LED rossi)

Per i fosfori remoti si sono riscontrati dei vantaggi rispetto ai COB/LLE per quanto riguarda il flusso emesso per basse temperature di colore ed elevati indici di resa cromatica, dove la ridotta temperatura di funzionamento dei fosfori e una riduzione del back-scatter consente una migliore efficienza. Il sistema offre una gestione più flessibile del prodotto (per cambiare indice di resa cromatica o tonalità della luce emessa è sufficiente sostituire il disco su cui sono deposti i fosfori, operazione che potrebbe essere fatta anche in esercizio).

Possiamo infatti immaginare l'impiego di alimentatori dimmerabili e un sistema di controllo del prodotto intelligente che consentano di modificare la corrente di alimentazione dei LED blu presenti all'interno della camera, andando a compensare la differente efficienza tra i fosfori a differenti CCT o resa cromatica, nell'ipotesi di aver dimensionato il prodotto per la massima corrente impiegata, corrispondente al massimo carico termico che il prodotto deve dissipare.

Per contro si registrano degli aumenti di costo del prodotto (acquisto del fosforo) e la dipendenza da un solo fornitore per l'approvvigionamento, la necessità di creare una camera di miscelazione che se non correttamente progettata potrebbe andare a ridurre il vantaggio competitivo rispetto ai sistemi tradizionali. Occorre anche osservare che i sistemi basati su fosforo remoto potrebbero non eliminare la necessità di un sistema ottico secondario (la camera potrebbe essere progettata per realizzare aperture del fascio minori, nell'intorno di 41-42° di semi-apertura rispetto a quella lambertiana, ma difficilmente si otterrebbero fasci molto stretti e uniformi).

I moduli a tecnologia ibrida analizzati consentono di ottenere efficienze superiori laddove è richiesto un indice di resa cromatica elevato (non vi è molta convenienza a realizzare tale sistema per indice di resa cromatica 80) a scapito di una complicazione elettronica nella gestione delle correnti di pilotaggio delle diverse tipologie di LED impiegate che comporta dei costi maggiori del sistema di alimentazione e controllo. Anche in questo caso occorre considerare un incremento dei costi dovuti alla presenza di una camera di miscelazione, il cui progetto rappresenta un fattore critico per non erodere il vantaggio in termini di efficienza fornito dalla tecnologia ibrida (le dimensioni devono essere contenute, sia ha necessità di ottiche aggiuntive per la realizzazione di fasci stretti, i materiali impiegati devono avere elevata riflettanza e costi compatibili con il tipo di prodotto realizzato).

Le prove effettuate hanno suggerito la possibilità di nuove linee di ricerca per approfondire alcuni aspetti della tecnologia dei sistemi ibridi:

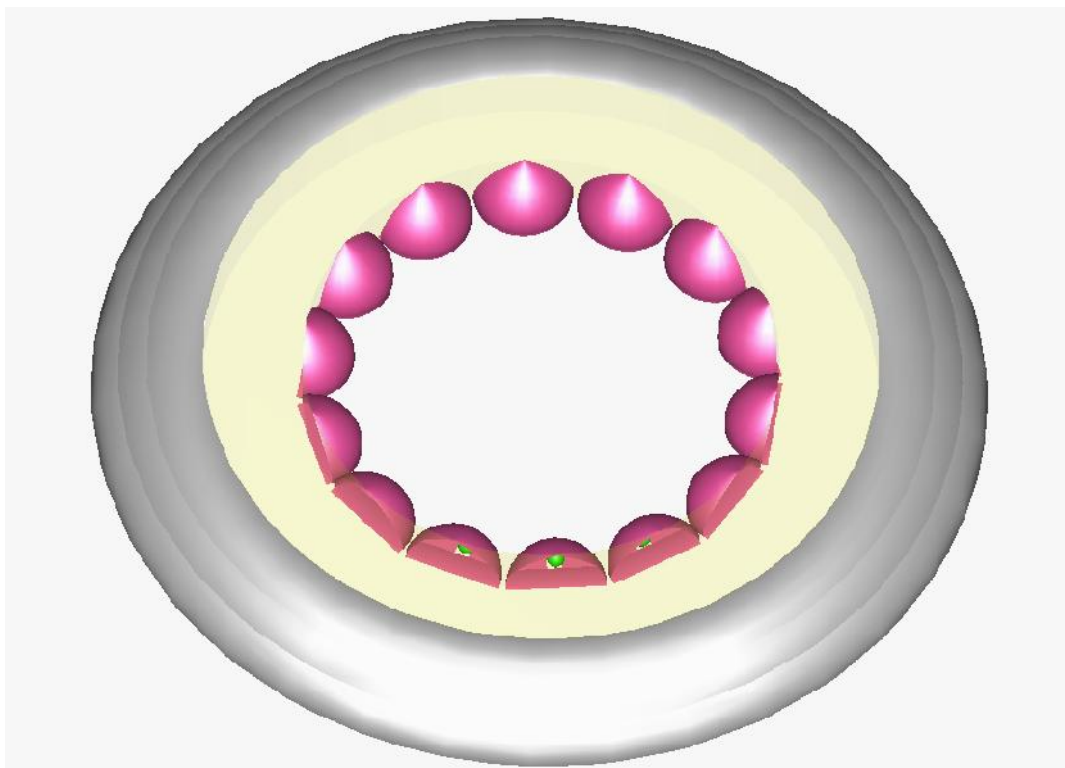
- Dipendenza della distribuzione cromatica dalla temperatura. La presenza di due diverse tecnologie LED mette a dura prova il sistema di controllo delle correnti nei diversi rami, che deve compensare in modo differente la deriva termica dei LED per mantenere costante la cromaticità emessa (l'elevata qualità del fascio emesso si misura anche dalla variazione del  $\Delta_{uv}$  sul diagramma cromatico, al variare delle condizioni di dissipazione termica). L'obiettivo minimo è quello di avere la medesima oscillazione delle coordinate cromatiche, al variare delle correnti di alimentazione, che si ottengono con un prodotto a fosfori remoti, ma una maggiore efficienza luminosa.
- Valutazione di quali complicazioni circuitali, come per esempio una retroazione non solo di temperatura, ma anche cromatica, comporta l'adozione di questa nuova tecnologia rispetto a quelle dei fosfori remoti o dei COB/LLE. In questo modo sarebbe possibile quantificare esattamente le performance conseguibili dai diversi sistemi di controllo e di valutarne la convenienza economica rispetto ad altri sistemi.



## 21 Concept iniziali per il progetto ottico proposto

Sono stati elaborati una serie di concept limitandosi a un solo motore luminoso, per esplorare le diverse possibilità offerte dalle varie tecnologie e soluzioni progettuali.

Il primo tentativo è stato sviluppato avendo come obiettivo principale quello di sviluppare un prodotto molto compatto, dallo spessore molto sottile, che consentisse di realizzare delle soluzioni a bianco dinamico, senza gli effetti collaterali della soluzioni con sorgenti tradizionali o dal semplice raggruppamento di power LED e ottiche TIR di adeguata apertura. Nei paragrafi precedenti, dall'esame della letteratura e dai numerosi prodotti disponibili sul mercato, è facile concludere che una soluzione del tipo "back lighting" possa essere utilizzata con profitto per la progettazione di un apparecchio di illuminazione per uffici. Si è quindi deciso di verificare la versatilità di questo schema, anche per la realizzazione di un fascio relativamente stretto, come descritto nel seguito del paragrafo.



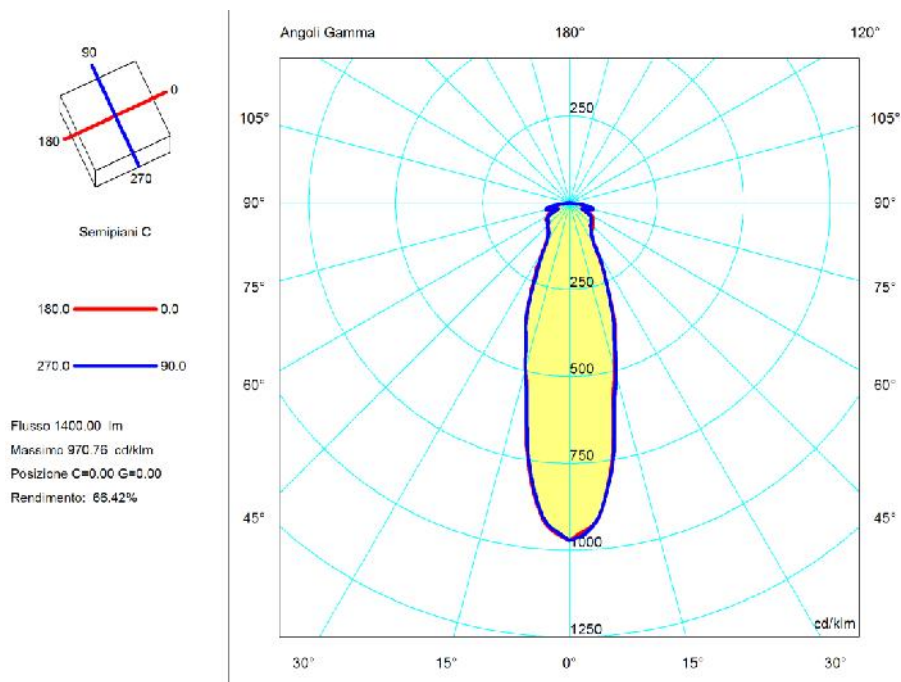
**Figura 130 Esempio di guida-luce, sviluppato come concept**

Si tratta di un apparecchio che utilizza mid-power LED (OSRAM Duris P5) a differente temperatura di colore che vengono miscelati all'interno della guida di luce (rappresentata in figura in colore giallo). L'accoppiamento tra LED (sfera verde) e guida avviene attraverso un riflettore ellittico (rappresentato in colore rosso), che ha lo scopo di ridirigere il flusso luminoso emesso dalle sorgenti all'interno dell'angolo di accettazione della guida.

Il mixing tra le differenti emissioni spettrali dei LED avviene nella guida, mentre il riflettore (colore grigio) ha lo scopo di indirizzare l'emissione nella guida all'interno nelle direzioni desiderate.

Quello rappresentato in figura costituisce un modulo di un sistema che deve essere opportunamente replicato al fine di ottenere i valori di illuminamento e di uniformità richiesti.

L'emissione dell'apparecchio è di tipo spot e rappresenta una possibile alternativa a un downlight tradizionale, che trova applicazione negli ambienti ad uso ufficio come ad esempio i corridoi e le reception.



**Figura 131 Distribuzione fotometrica dell'apparecchio guida-luce**

L'apertura del fascio viene controllata dal riflettore esterno la cui geometria può essere opportunamente studiata per ottenere l'apertura del fascio desiderata: nel caso rappresentato (Figura 131) l'apertura è di circa 2x16° (fascio stretto).

I principali vantaggi della soluzione precedente sono la facilità di dissipazione dovuta all'impiego di un numero cospicuo di LED a bassa potenza che consentono di meglio distribuire il calore sul dissipatore (non rappresentato nella Figura 130) evitando concentrazioni che portano l'aumento della temperatura di giunzione in alcune sorgenti rispetto ad altre, la buona miscelazione del fascio emesso, qualora si decidesse di realizzare un sistema a temperatura di colore variabile.

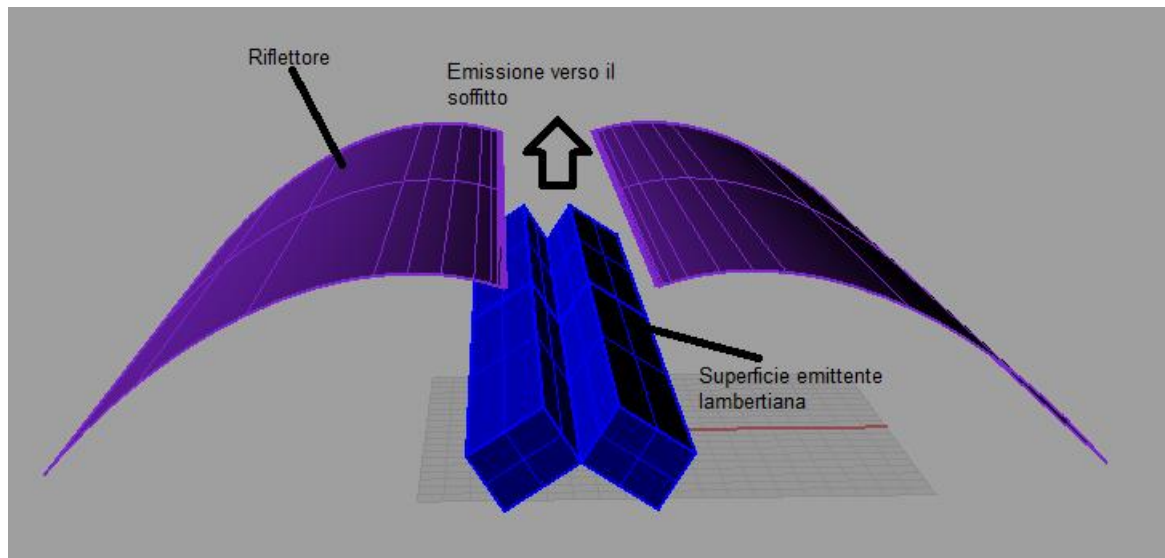
Si è poi passati a considerare una soluzione che potesse tenere conto dei seguenti aspetti:

- Non limitare la propria distribuzione fotometrica a un puro solido di rotazione
- Il riflettore, di preferenza, avrebbe dovuto essere ottenuto solo per curvatura di una lastra piana di alluminio (per semplicità ed economicità costruttiva), di adeguate caratteristiche riflettenti
- La sorgente luminosa avrebbe dovuto essere costituita da una camera di miscelazione in modo da consentire il confronto tra diverse tecnologie di generazione di luce bianca (per esempio fosfori remoti, sistemi ibridi, mixing di LED bianchi a diverse temperature correlate di colore, ecc.)
- Il motore luminoso avrebbe dovuto essere un componente riutilizzabile in altri contesti, con l'aggiunta di eventuali altre componenti ottiche o accessori
- Considerare l'eventualità di una emissione diretta e indiretta

Il primo schema di concept realizzato è quello riportato alla Figura 132, dove si vedono due sorgenti luminose inclinate (indicate in colore blu) in una struttura a V che indirizzano la luce verso un'ottica riflettente. Si tratta di una struttura simmetrica con un'apertura nella parte centrale con la quale realizzare l'emissione indiretta verso il soffitto. Si tratta di un apparecchio a sospensione, deve poter essere integrato in una struttura di tipo modulare.

Ciascun motore luminoso è costituito da una camera di miscelazione, da un diffusore o da un fosforo remoto la cui emissione possiamo ritenere in prima approssimazione lambertiana, con un flusso emesso di circa 2000 lm (l'intero apparecchio avrebbe dovuto avere un flusso luminoso pari a circa 4000 lm).

Nella fase iniziale, nessuna considerazione sugli aspetti termici del prodotto è stata fatta: il valore di 4000 lm è stato determinato per confronto con i flussi emessi dalla maggior parte degli apparecchi a LED presenti sul mercato, in applicazioni simili.



**Figura 132** Schema del concept di partenza

La distribuzione fotometrica ottenuta è quella riportata alla Figura 133: il risultato considera l'adozione di un alluminio SACAL 106 HB<sup>a</sup> per la realizzazione del riflettore. La simulazione non tiene conto della presenza di un eventuale materiale diffondente posto tra le due parti del riflettore, con lo scopo di uniformare l'emissione verso l'alto evitando la formazione di sgradevoli "bolli" di luce in corrispondenza dell'apparecchio e permettendo una miscelazione dell'emissione della parte destra e sinistra che potrebbero avere temperatura di colore differente necessaria a realizzare un bianco dinamico.

La fotometria ottenuta è stata utilizzata per valutare il prodotto in uno schema impiantistico che riproducesse una situazione di ufficio, mediante l'impiego di un software di simulazione illuminotecnica (Dialux).

Le principali criticità dello schema proposto sono state le seguenti:

- Scarso controllo dell'emissione superiore mediante un semplice diffusore
- Ingombri elevati dovuti alla struttura a V (462 mm di larghezza e 570 mm di lunghezza, con una altezza del riflettore, nel suo punto più alto di 90 mm circa)
- Difficoltà di realizzare un sistema modulare attraverso la ripetizione dello schema proposto
- Impossibilità di utilizzare questo schema per realizzare un incasso 60x60 molto diffuso in alcune situazioni
- Qualche dubbio, sulla base della stima del numero di LED a luce bianca<sup>b</sup>, sulla possibilità di ottenere 4000 lm dai due motori luminosi (le dimensioni sono 40 mm x 40 mm per una lunghezza di 570 mm), con un valore della temperatura di giunzione accettabile (non superiore a 75-80°C).  
Supponendo infatti di considerare un LED a 3000K con CRI minimo di 80, possiamo supporre di avere un flusso per LED pari a 95 lm @350 mA con una  $T_j=85^\circ\text{C}$ : in questo caso il numero di LED per ciascuno dei due motori luminosi risulta pari a 21 circa con una potenza impiegata pari a 22 W<sup>c</sup>.  
La potenza da dissipare, dovrebbe quindi essere il 70-75% di quella elettrica pari a circa 16 W per ciascun motore luminoso.

<sup>a</sup> Questo alluminio è caratterizzato da un elevato valore di riflettanza nella direzione speculare e da una bassa componente diffusa

<sup>b</sup> Occorre ricordare che il dimensionamento deve essere fatto per il più basso valore di temperatura correlata di colore per il quale l'efficienza dei LED a conversione di fosforo risulta inferiore.

<sup>c</sup> Per il calcolo, la Vf di ciascun LED è stata assunta pari a 3 V

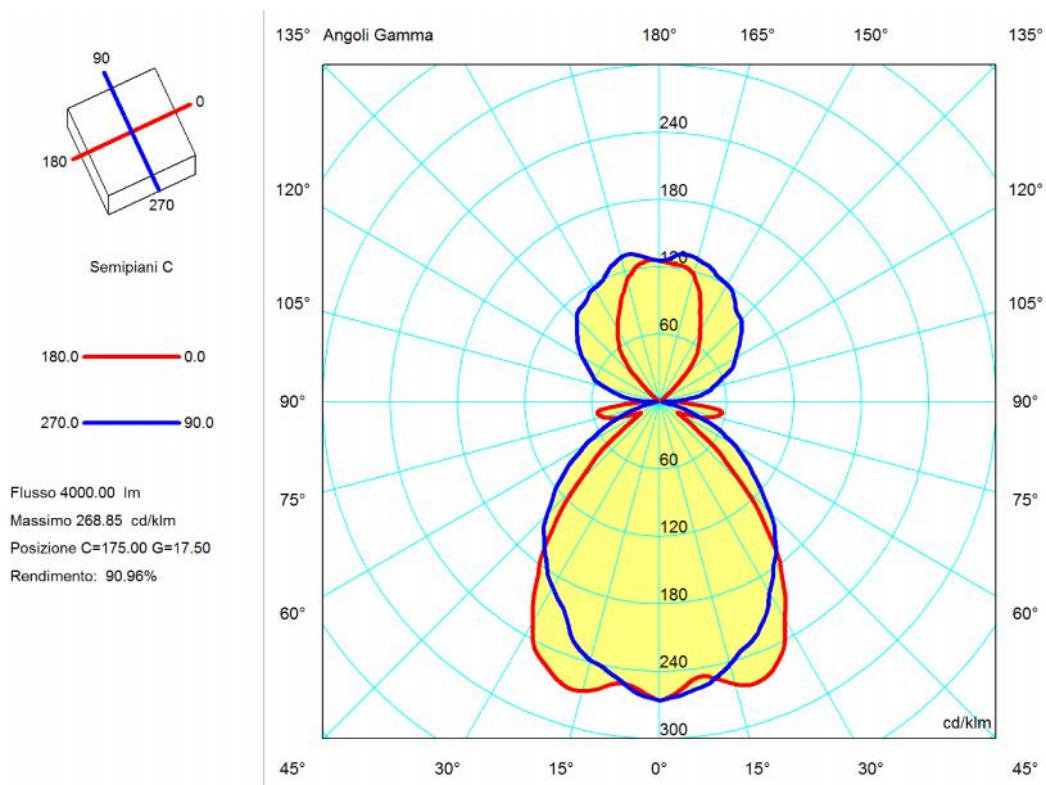
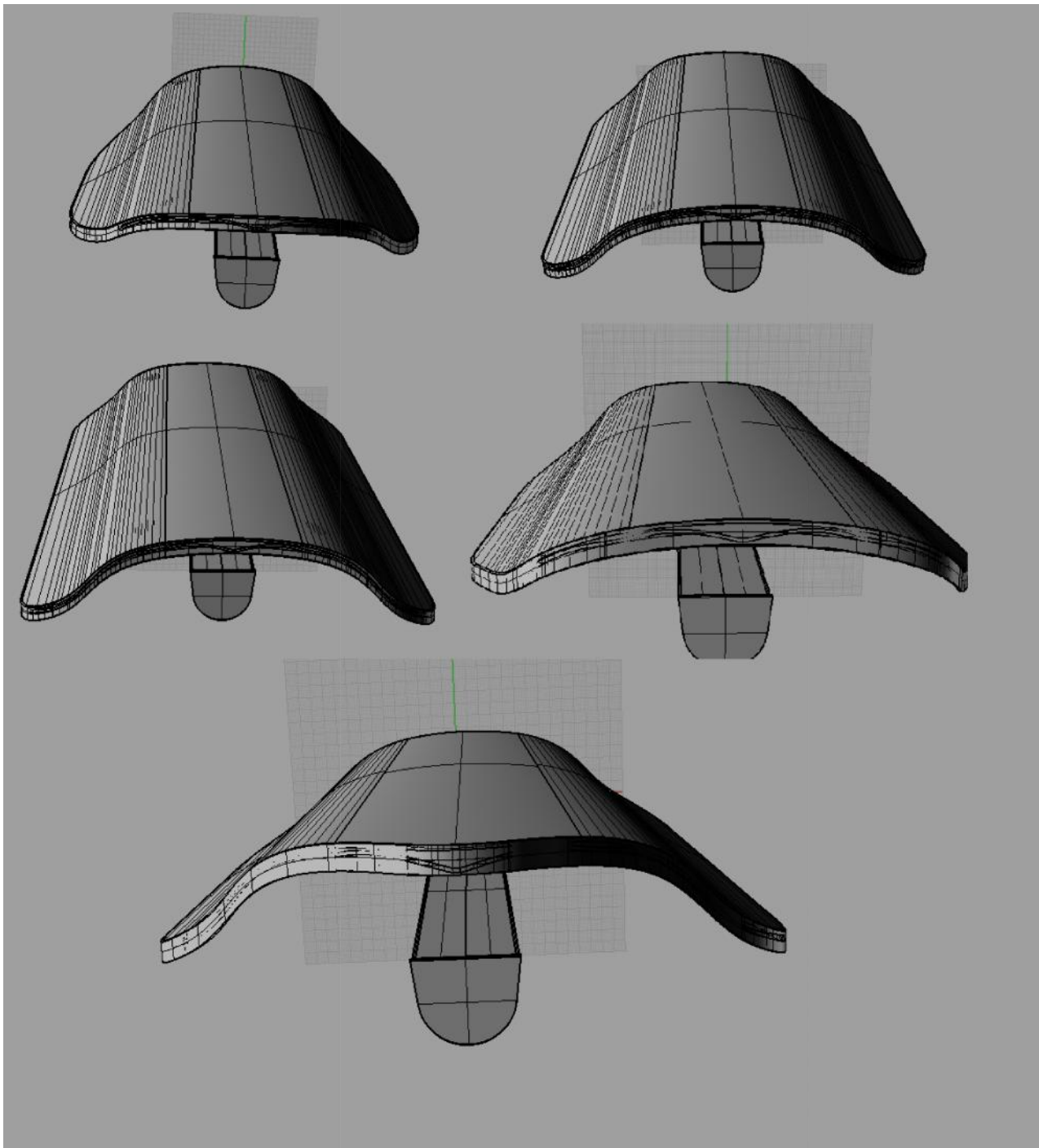


Figura 133 Distribuzione fotometrica del concept iniziale

Sulla base delle considerazioni precedenti, si è deciso di modificare lo schema del concept precedente, eliminando la struttura a V e l’emissione verso il soffitto, nel tentativo di rafforzare il concetto di realizzare un sistema luminoso complesso che fosse la ripetizione del medesimo elemento progettuale nello spazio. Si è giunti pertanto ad uno schema con un solo elemento centrale posto orizzontalmente, diviso in due parti (in modo da consentire la possibilità di realizzare un bianco dinamico) coperto da un riflettore ottenuto da piegatura di lastra piana.

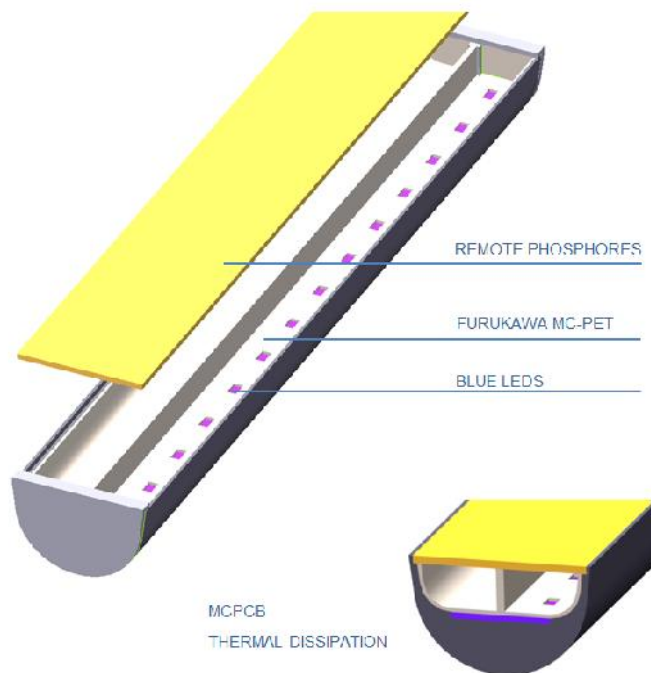
La Figura 134, mostra alcuni dei modelli di studio utilizzati durante il progetto: ciascuno di questi è stato progettato e simulato e le performance di rendimento e in termini di risultanze impiantistiche sono state messe a confronti con i requisiti di progetto e con le alternative.



**Figura 134** Concept di studio utilizzati per la progettazione ottica del riflettore

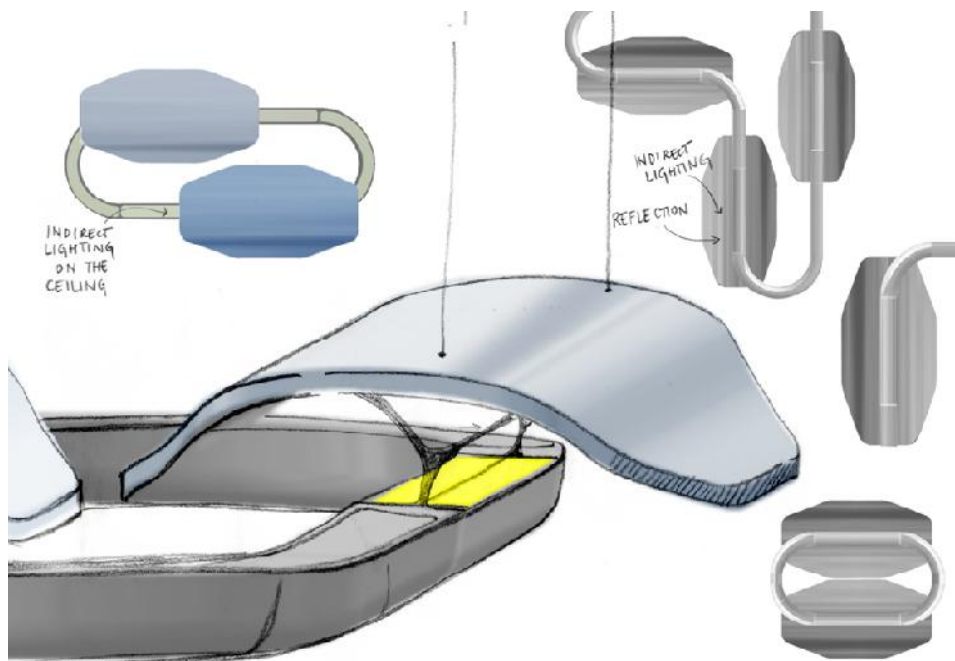
Il dettaglio del motore luminoso è riportato alla Figura 135: si osserva che il sistema consente di ospitare una doppia tecnologia, a fosfori remoti, con la possibilità di ottenere luce bianca dinamica<sup>a</sup>, oppure con LED a conversione di fosforo, con le medesima possibilità. Il modello rappresentato è stato opportunamente semplificato per quanto riguarda la parte di dissipazione, anche se nel progetto ottico del riflettore si è del considerato il massimo ingombro costituito dall'elemento dissipante.

<sup>a</sup>Il risultato si ottiene mediante l'utilizzo di due fosfori a differente temperatura correlata di colore



**Figura 135** Dettaglio del motore luminoso a doppia tecnologia. Nella figura è rappresentata la soluzione a fosfori remoti.

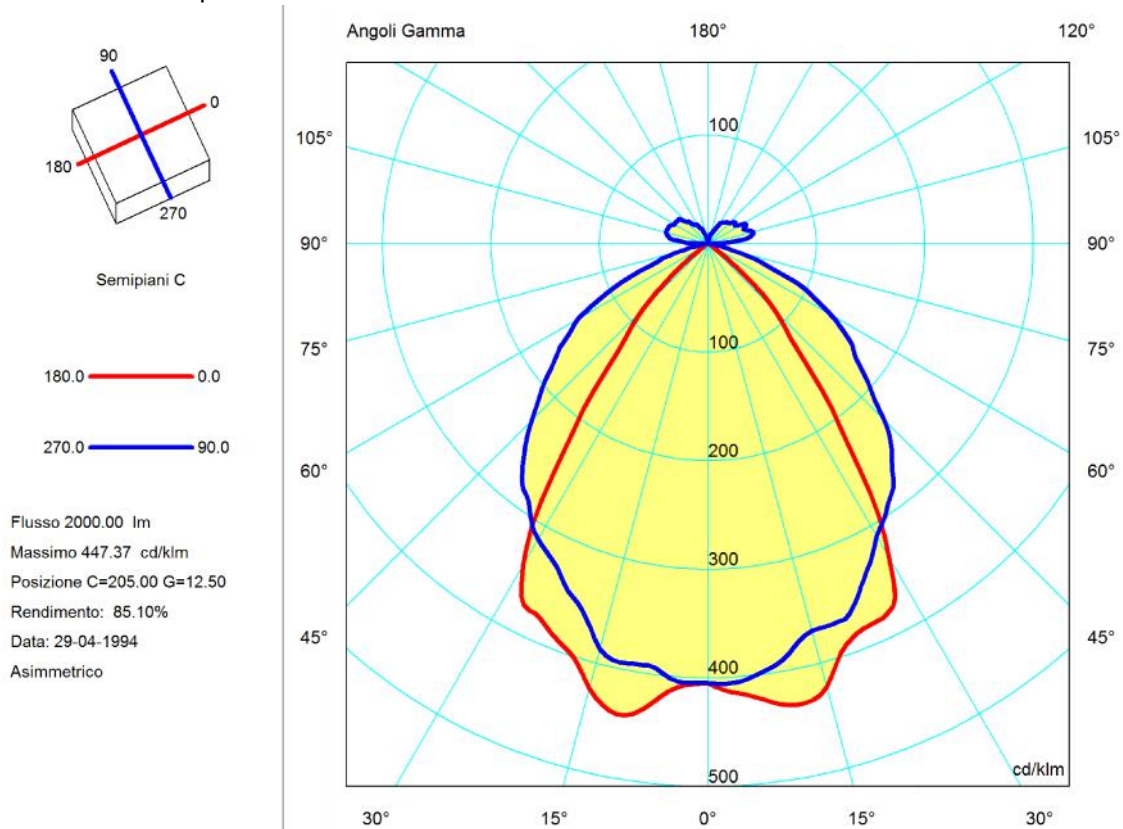
Il concetto di sistema luminoso modulare, ottenuto dalla ripetizione dello stesso elemento formale, è ora più facilmente ottenibile dando luogo a risultati più gradevoli dal punto di vista estetico: l'esemplificazione di questo concetto è mostrata alla Figura 136.



**Figura 136** Esempificazione del concetto di sistema luminoso

Per ciascuno dei concept di studio rappresentati alla Figura 134, sono state effettuate delle simulazioni di ray-tracing al fine di determinare la migliore soluzione dal punto di vista delle performance fotometriche e impiantistiche.

La fotometria dell'apparecchio nella nuova configurazione è quella riportata alla Figura 137, dove il minor valore del rendimento 85% rispetto a 87% inizialmente stimato, dipende dalla scelta del materiale riflettente Sacal 106 rispetto a Sacal 106 HB.

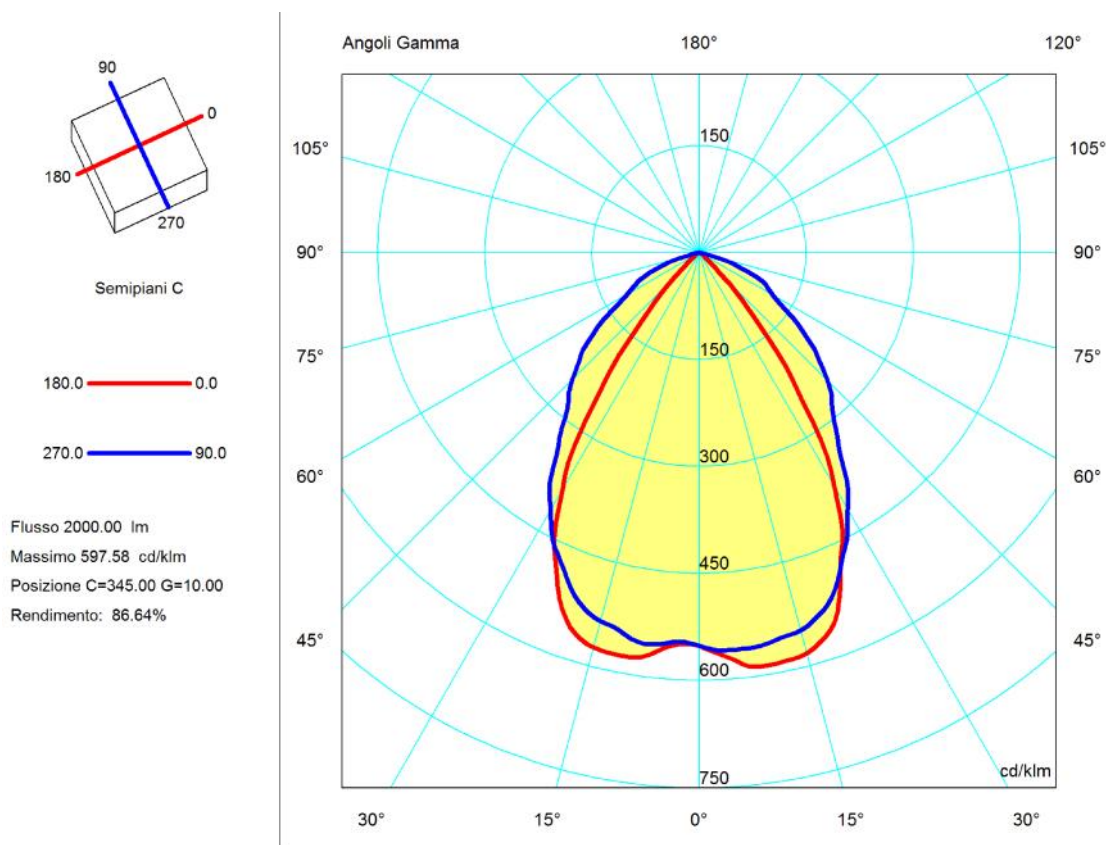


**Figura 137 Distribuzione fotometrica apparecchio a doppia tecnologia**

L'evoluzione del progetto ha portato a considerare che il massimo confort e la massima flessibilità di impiego avrebbero portato all'esigenza di un apparecchio che controllasse l'emissione luminosa anche nel piano C90-270°, realizzando una distribuzione fotometrica maggiormente chiusa rispetto a quella indicata alla Figura 137.

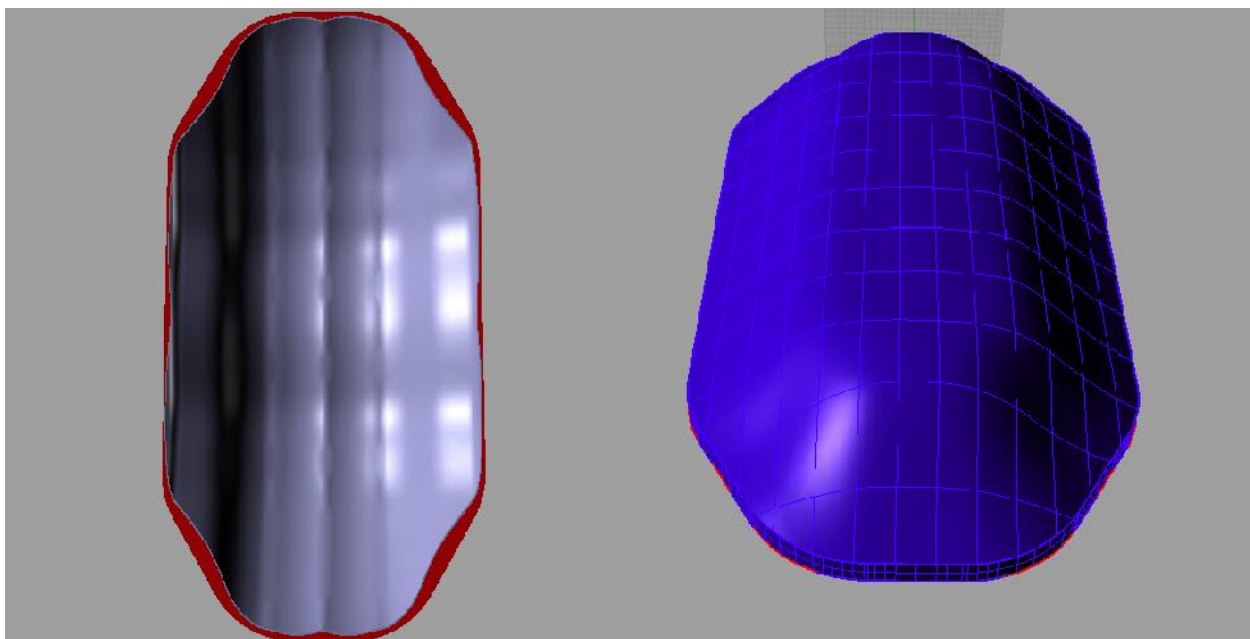
Per la realizzazione di questo obiettivo si è dovuto rinunciare alla semplicità costruttiva dovuta all'unica curvatura del profilo riflettente, per ottenere una superficie che consenta il controllo anche nell'emissione del piano C90-270°.

La distribuzione fotometrica ottenuta è riportata alla Figura 138, mentre la superficie riflettente è riportata alla Figura 139: nell'immagine non è stato mostrato il modulo contenete il fosforo remoto per maggiore chiarezza.



**Figura 138 Distribuzione fotometrica apparecchio con riflettore a doppia curvatura**

Come si osserva dall’esame dell’indicatrice di emissione del piano C90-270°, l’introduzione della seconda curvatura ha consentito un migliore controllo dell’emissione luminosa anche per angoli  $\gamma$  maggiori di 50°.



**Figura 139 Riflettore a doppia curvatura adatto per illuminazione di uffici**

Anche in questo caso la finitura del riflettore è altamente specchiante, corrispondente a quella dell’alluminio SACAL 106 HB: sono state condotte una serie di prove con allumini con minore specularità e



maggior componente diffusa, che hanno prodotto risultati accettabili, dal punto di vista della distribuzione fotometrica, ma con valori di rendimento leggermente inferiori.

## 22 Progetto della sorgente a fosfori remoti

Per la progettazione della sorgente a fosfori remoti si è fatto riferimento alla documentazione del produttore, disponibile on-line. A partire da queste informazioni è stato sviluppato il progetto di massima, cercando successivamente di approfondirne alcuni aspetti sulla base della letteratura scientifica a disposizione e su qualche prova di laboratorio.

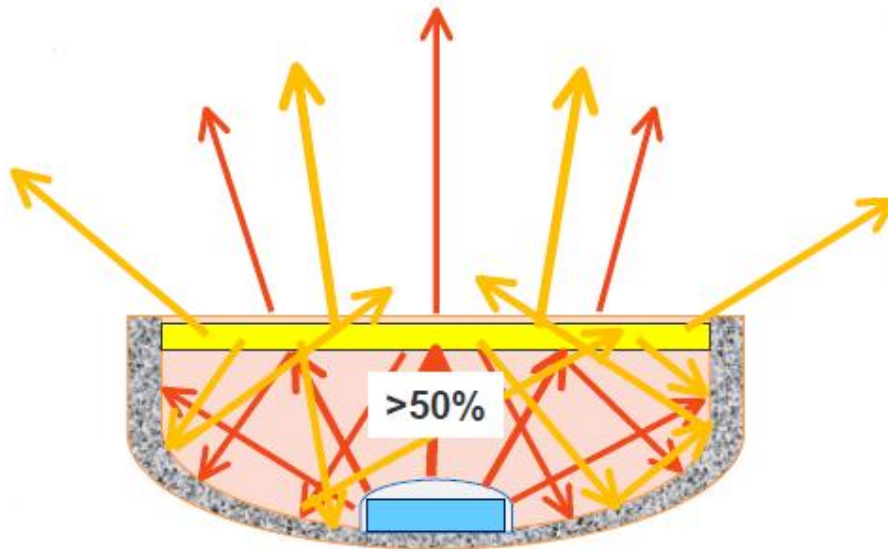


Figura 140 Schema di funzionamento di una sorgente a fosfori remoti<sup>a</sup>

Con riferimento alla Figura 140, un LED blu emette della potenza radiante nella banda centrata sulle corte lunghezza d'onda (450 nm-465 nm), parte di questa radiazione viene riflessa dalle pareti della camera di miscelazione e parte incide direttamente sul fosforo remoto, che riflette parte della radiazione all'interno della camera, parte viene assorbita e parte viene riconvertita in luce gialla che viene emessa in modo isotropo parte all'interno della camera e parte all'esterno. Una parte della luce blu emessa dai LED viene trasmessa direttamente all'esterno del fosforo, senza subire conversioni o assorbimenti, si miscela con la componente gialla emessa dal fosforo, producendo luce bianca.

Sulla base del meccanismo descritto, si possono fare le seguenti osservazioni:

- Il fattore di riflessione della superficie interna della camera è un elemento critico del progetto: le performance, in termini di flusso emesso complessivamente dal sistema, aumentano in misura del 6-8% se si passa da fattore di riflessione pari a 97% al 99%<sup>b</sup>
- Il progetto della camera è critico, considerando il fatto che la luce viene riflessa più volte all'interno della camera e che quindi evitare delle perdite al suo interno determina le performance dell'intero sistema.

Il bilancio del sistema è rappresentato schematicamente alla Figura 141.

<sup>a</sup> Chuck Edwards, "Novel remote phosphor architectures and methods for modeling performance", IEEE Nano Seminar– Santa Clara, May 17, 2011

<sup>b</sup> Si veda quanto scritto nel paragrafo precedente sui materiali riflettenti

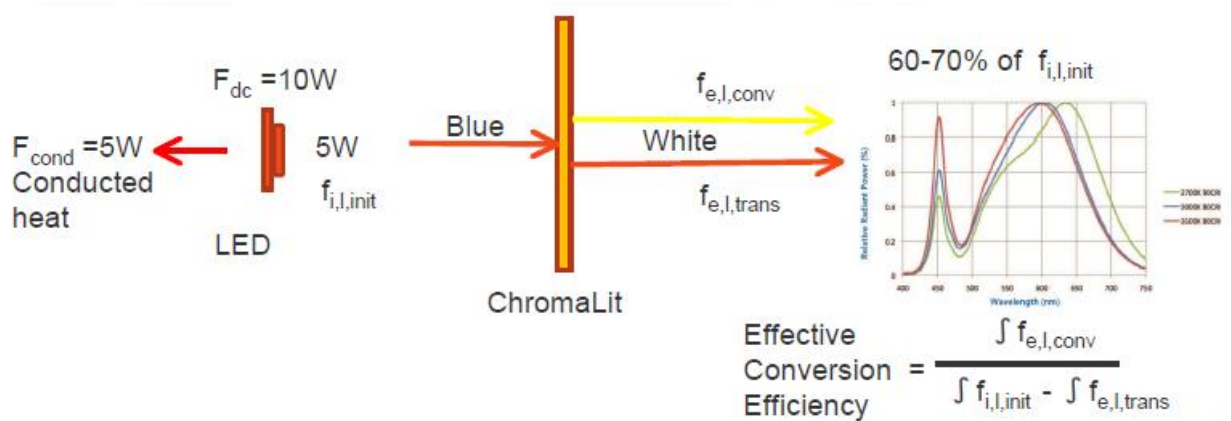


Figura 141 Schema per il bilancio energetico di una sorgente a fosfori remoti<sup>a</sup>

Con riferimento alla Figura 141, supponendo che la potenza elettrica assorbita dei LED sia pari a 10W, il 50% della potenza viene convertita in emissione luminosa nella banda del blu e circa il 60-70% di essa, in dipendenza delle caratteristiche del fosforo scelto (temperatura correlata di colore e indice di resa cromatica), contribuisce a formare la luce bianca in uscita (combinazione della luce blu che esce direttamente dal fosforo remoto e della luce gialla, ottenuta da conversione).

Nello schema precedente, la camera di miscelazione ha una duplice funzione: recuperare la potenza radiante (blu) riflessa dal FR, la potenza radiante gialla emessa verso il LED e di ottenere una miscelazione delle due componenti al fine di ottenere luce bianca di adeguate caratteristiche cromatiche.

Al fine di dimensionare correttamente la camera di miscelazione, i calcoli sono stati fatti per un una luce bianca alla temperatura correlata di colore di 3000K.

Per il bilancio energetico, occorre considerare almeno i seguenti contributi:

**PSE:** power supply efficiency (dipende dalle caratteristiche del sistema di alimentazione, valori indicativi possono oscillare tra 0.85 e 0.92)

**WPE:**  $W_{optical}/DCW$  conversion efficiency of blu LED (dipende dalle caratteristiche del LED blu impiegato, si aggira attorno al 50%)

**MCE:** relative efficiency of mixing chamber (rappresenta l'efficienza della camera di miscelazione, intesa come rapporto tra la potenza radiante emessa dai LED blu e quella uscente dalla camera)

**lm/W<sub>optical</sub>:** remote phosphor conversion efficiency (dipende dal solo fosforo remoto, in particolare dal valore di temperatura di colore e di resa cromatica, scelti in base alla particolare applicazione illuminotecnica del prodotto).

Una stima attendibile del flusso luminoso in uscita del dispositivo, si ottiene attraverso la seguente relazione<sup>b</sup>:

$$\text{Luminous Flux output}(lm) = \text{Power AC input (Watts)} * PSE * WPE * MCE * lm/W_{optical}$$

Dall'applicazione della relazione precedente, considerando un sistema composto da due camere di miscelazione, ciascuna contenente 14 LED blu, alimentati alla corrente di 350 mA, si ottengono le informazioni, riportati alla Tabella 16.

<sup>a</sup> Chuck Edwards, "Novel remote phosphor architectures and methods for modeling performance", IEEE Nano Seminar– Santa Clara, May 17, 2011

<sup>b</sup> Chuck Edwards, "Novel remote phosphor architectures and methods for modeling performance", IEEE Nano Seminar– Santa Clara, May 17, 2011

**Tabella 16 Dimensionamento di un singolo compartimento della sorgente a fosfori remoti**

N LED	14.00		
LED model	Luxeon LXML-PR02		
P ottica LED BLU (W)	1.12 @Tpad=25°C	0.5565 @Tpad=25°C	
WPE	0.53		
MCE	0.91		
Radiant Power BLU LED vs Tpad	0.963 @Tpad=75°C		
lm/W(opt) Typ	200 @T=25°C	3000K	
lm/W(opt) Typ	195 @T=80°C	3000K	
Flusso sorgente FR(lm)	1365.50 @T=25°C	3000K	
Flusso sorgente FR(lm)	1331.36 @T=80°C	3000K	
P <sub>elettrica</sub> LED BLU (W)	14.7		
Rendimento ottico riflettore	0.87		
Flusso apparecchio (lm)	1187.982743 @T=25°C	3000K	
Flusso apparecchio (lm)	1158.283175 @T=80°C	3000K	
lm/W apparecchio	80.8151526 @T=25°C	3000K	
lm/W apparecchio	78.79477379 @T=80°C	3000K	
ΔEff/ΔT	0.03673416		
lm/W apparecchio completo	80.6314818 @T	75 °C	

Efficacia (lm/W) fosforo remoto a T=75°C

lm/W(opt) Typ	200.00	T <sub>phosphor</sub>	25	°C
lm/W(opt) Typ	195.00	T <sub>phosphor</sub>	80	°C
lm/W(opt) Typ	195.45	T <sub>phosphor</sub>	75	°C

$$\Delta(\text{lm/W})/\Delta T \quad -0.090909091$$

Nella tabella si è volutamente ignorato il termine PSE (efficienza del sistema di alimentazione), dal momento che non è stato oggetto della progettazione. Per il calcolo è stato considerato un LED blu Luxeon LXML-PR02, con una potenza ottica di 1.12 W per una temperatura di giunzione di T<sub>j</sub>=25°C, alimentato alla corrente di 700 mA. L'emissione delle sorgenti di luce blu sono state opportunamente ridotte per simulare una temperatura di giunzione di 75°C, secondo le informazioni contenute nel datasheet del costruttore del semiconduttore<sup>a</sup>.

Per quanto riguarda l'efficacia luminosa del fosforo remoto (lm/W<sub>radiati</sub>), è stato considerato il valore indicato da Intematix (Figura 130) per una temperatura del fosforo di 80°C: in basso alla tabella è stato determinato, mediante interpolazione lineare dei valori forniti per due differenti temperature T<sub>ph</sub>=25°C e T<sub>ph</sub>=80°C, in modo da determinare il parametro di efficienza a 75°C (supponendo il fosforo remoto isoterma con la giunzione dei LED). Le variazioni rispetto al valore utilizzato per il calcolo del flusso emesso risulta trascurabile e pertanto non è stato considerato.

<sup>a</sup> Philips Lumileds, "LUXEON Rebel Color Portfolio Datasheet DS68", 2012/12/19

**Optical and Performance Characteristics**

Color Designation	CCT <sup>1</sup> (K)	Color Consistency <sup>2,3</sup>		CRI <sup>1</sup>	Viewing Angle <sup>1</sup> (deg)	Conversion Efficacy <sup>3</sup> (lm/W <sub>rad</sub> ) at 25°C		Conversion Efficacy <sup>3</sup> (lm/W <sub>rad</sub> ) at 80°C	
		SDCM	CCT (K)			Minimum	Typical	Minimum	Typical
CL-827	2700	3	±70	80	115	165	180	160	175
CL-927	2700	3	±70	90	115	145	160	140	155
CL-830	3000	3	±90	80	115	185	200	180	195
CL-930	3000	3	±90	90	115	155	165	150	160
CL-835	3500	3	±110	80	115	190	205	186	200
CL-840	4000	3	±120	80	115	195	210	190	205
CL-750	5000	4	±170	70	115	215	230	221	225

**Figura 142 Efficacia luminosa fosforo remoto**

Ciascun compartimento della sorgente a fosfori remoti assorbe una potenza elettrica pari a  $0.350A \cdot 3.0V \cdot 14 = 14.7 \text{ W}$  ed emette un flusso luminoso pari a circa 1158 lm (@ $T_j = 75^\circ\text{C}$  e  $T_{\text{phosphor}} = 80^\circ\text{C}$ ), con una efficienza luminosa pari a  $1331 \text{ lm} / 14.7 \text{ W} = 90.54 \text{ lm/W}$  (escludendo le perdite del sistema di alimentazione).

Se si considera anche il rendimento del sistema ottico costituito dal riflettore ( $\eta = 0.87$ ), il flusso luminoso emesso dall'intero sistema nelle medesime condizioni termiche specificate, risulta pari a 1158 lm, con una efficienza di circa 80 lm/W.

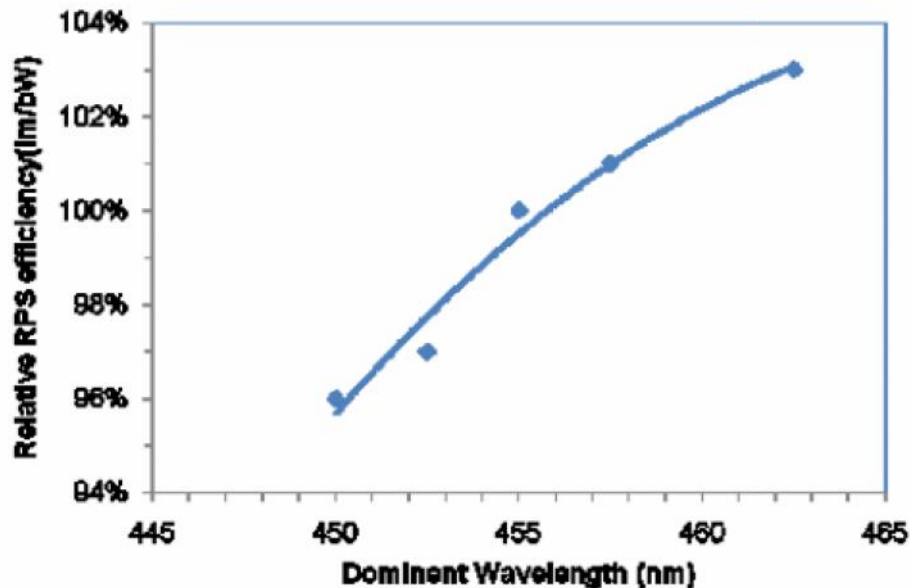
Si osserva che i dati riportati sono riferiti alla temperatura correlata di colore di 3000K, limite inferiore per in sistema a bianco dinamico, con indice di resa cromatica pari a 80 (caratteristica adeguata alla maggior parte della applicazioni in uffici).

I fattori che possono influenzare la quantità di flusso emesso, sono essenzialmente tre:

- Lunghezza d'onda dominante del LED blu impiegato<sup>a</sup>: il fosforo remoto risulta ottimizzato per una lunghezza d'onda dominante di 455 nm, variazioni dell'eccitazione tra 450 nm e 462.5 nm (lunghezza d'onda dominante) comportano un aumento dell'efficacia di conversione pari al 7% circa (Figura 143). Il costruttore del fosforo consiglia di ottimizzare il proprio sistema per una lunghezza dominante pari a 455 nm, corrispondente a una lunghezza d'onda di picco di circa 450nm

<sup>a</sup> Il costruttore del fosforo remote utilizza la lunghezza d'onda dominante come parametro di progetto (corrisponde a una distribuzione spettrale con una sola lunghezza d'onda in cui il colore percepito è lo stesso della sorgente colorata analizzata)

### Blue Wavelength impact on lm/W(opt)



**Figura 143 Andamento dell'efficacia del fosforo remoto (flusso luminoso/Potenza ottica blu) in funzione della lunghezza d'onda dominante dell'eccitazione BLU.<sup>a</sup>**

Nel nostro caso il LED impiegato presenta una lunghezza d'onda di picco compresa tra 440 nm e 460 nm<sup>b</sup>, con un valore tipico di 447.5 nm: i valori si riferiscono a una temperatura di giunzione di 25°C con il dispositivo alimentato alla corrente di 700 mA (condizioni per le quali viene effettuato il binning). Lo spostamento della lunghezza d'onda di picco per effetto del riscaldamento della giunzione è stimato in 2 nm, valore per cui l'efficacia del fosforo remoto si mantiene sufficientemente elevata (Figura 143).

- Efficienza della camera di miscelazione, che nel progetto è stata assunta pari a 0.91, in conformità alla camera di miscelazione Intematix presente nel demo-kit: questa assunzione prevede dei vincoli di progetto sulla qualità del materiale riflettente utilizzato per la costruzione del riflettore della camera, su dettagli costruttivi quali le dimensioni dei fori sul riflettore in corrispondenza delle sorgenti LED, dall'accoppiamento tra fosforo remoto e riflettore. Il valore di 0.91 per il demo kit di Intematix, è stato verificato mediante misure di laboratorio
- Dalla capacità del sistema di "estrarre" calore dalla giunzione dei LED cedendola all'ambiente circostante, in modo da mantenere una  $T_j=75^\circ\text{C}$ , come fissato durante lo sviluppo del progetto.

#### 22.1 Dipendenza dalla temperatura

Per i power LED a conversione di fosforo usati in molte applicazioni di lighting design, esiste uno stretto legame tra la potenza elettrica, e la temperatura della giunzione e del fosforo; per un sistema a fosfori remoti, la temperatura di giunzione e quella del fosforo possono essere significativamente differenti. Occorre quindi analizzare con maggiore dettaglio il legame tra queste tre grandezze e il loro effetto sul flusso luminoso emesso dalla sorgente:

- Temperatura ambiente
- Temperatura di giunzione
- Temperatura del fosforo

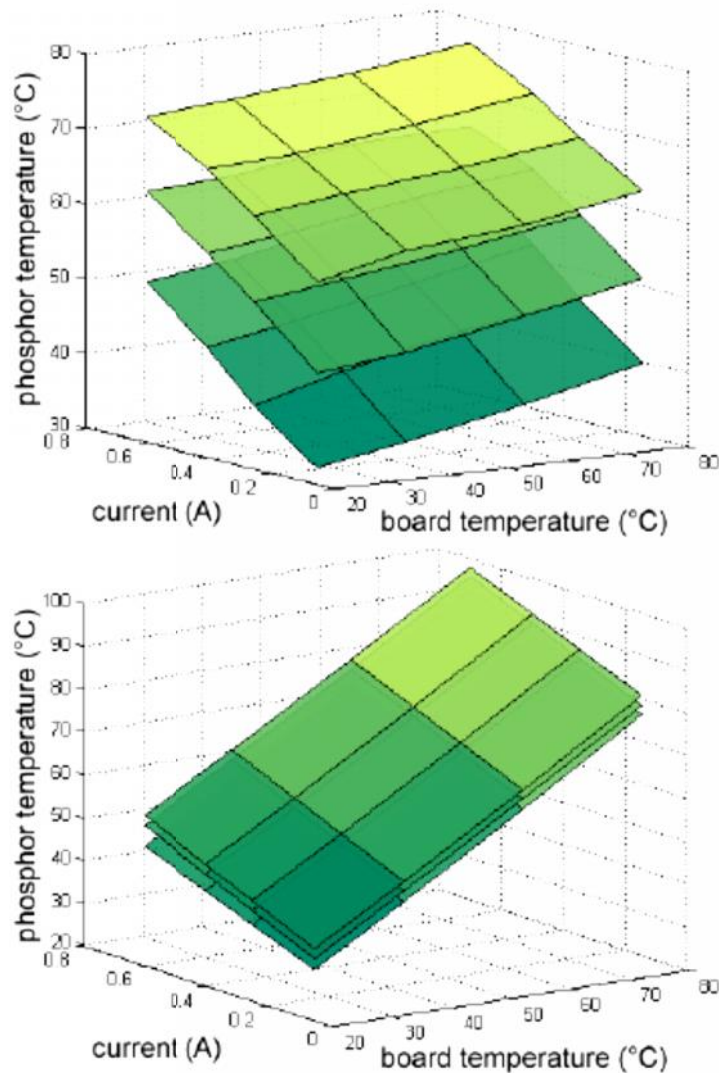
Alcuni ricercatori<sup>69</sup>, hanno valutato il flusso radiante spettrale di tre differenti moduli a fosfori remoti, privi del disco su cui sono depositi i fosfori, per 5 differenti valori della corrente di alimentazione (150 mA, 250

<sup>a</sup> Chuck Edwards, "Novel remote phosphor architectures and methods for modeling performance", IEEE Nano Seminar– Santa Clara, May 17, 2011

<sup>b</sup> Philips Lumileds, "LUXEON Rebel Color Portfolio Datasheet DS68", 2012/12/19

mA,350 mA,500 mA,700 mA), per cinque valori della temperatura di giunzione.<sup>a</sup> La misura è stata condotta alla sfera integratrice di diametro 1 m, equipaggiata con uno spettro radiometro, nella quale era possibile controllare la temperatura interna dello strumento.

Una seconda serie di misure, con le stesse modalità è stata compiuta completando le sorgenti con i rispettivi dischi su cui erano stati depositati i fosfori.



**Figura 144** Temperatura del fosforo per due delle sorgenti esaminate, in funzione della corrente di alimentazione e della temperatura del PCB per 3 differenti valori della temperatura ambiente della sfera (25°C,50°C,55°C), che sono rappresentati nella figura mediante 3 superfici. I risultati della sorgente 1 sono riportati in alto, della numero 3 in basso alla figura.

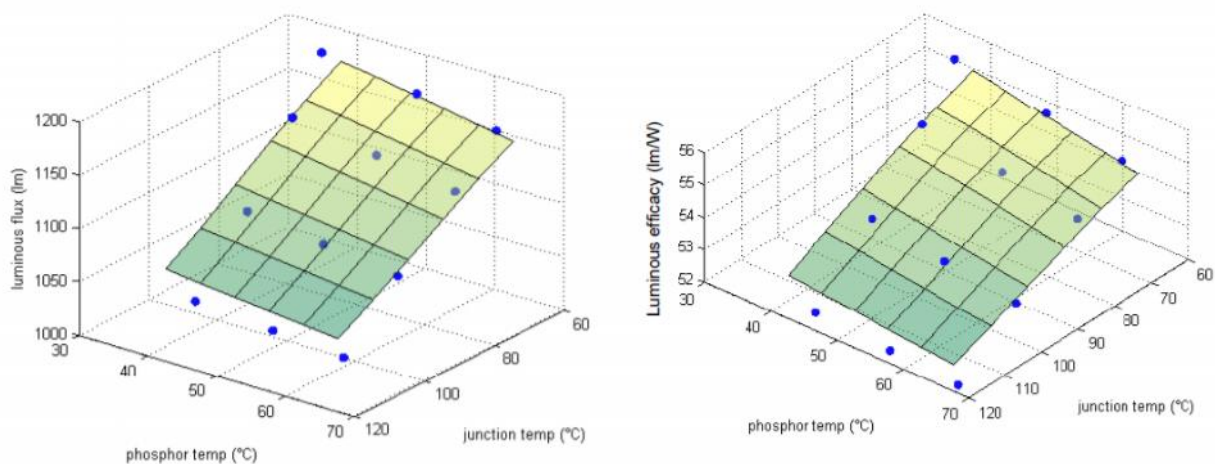
Dall’esame della Figura 144, si osserva che per la sorgente 1 (in alto), per una data temperatura ambiente l’aumento della corrente (o del flusso di eccitazione emesso dai LED), prevale sul fenomeno dell’aumento della temperatura di giunzione o della temperatura del PCB nel determinare la temperatura del fosforo: la spiegazione è che il riscaldamento del fosforo dipende dalla proporzionalità tra flusso incidente e assorbimento non radiativo, mentre il legame tra la temperatura del fosforo e temperatura di giunzione può essere schematizzato da una resistenza termica elevata per questo tipo dispositivo. Il risultato è che la temperatura ambiente influenza molto la temperatura del fosforo: all’aumentare di 15°C della temperatura ambiente, corrisponde un aumento di circa 10°C della temperatura del fosforo per ogni coppia corrente - temperatura del PCB.

<sup>a</sup> Ottenuti attraverso una cella di Peltier che raffreddava o riscaldava il PCB su cui erano stati saldati i LED

Nel dispositivo 3 (in basso) la resistenza termica tra giunzione/PCB e fosforo risulta sensibilmente inferiore rispetto a quella del dispositivo 1: in questo caso, per ciascuna coppia corrente di alimentazione e temperatura di giunzione, un aumento della temperatura ambiente di 15°C comporta un aumento della temperatura del fosforo nell'ordine di 2-3°C. La conseguenza è che una variazione della temperatura della board o della giunzione ha un effetto maggiore sulla temperatura del fosforo rispetto alla sorgente precedente. Inoltre a parità di temperatura ambiente, l'aumento della corrente produce un effetto minore sulla temperatura del fosforo.

Il risultato dedotto dagli autori è stato che i LED blu e il fosforo remoto possono essere trattati, dal punto di vista del dimensionamento termico, come due sorgenti di calore distinte e che l'effetto delle variazioni della temperatura ambiente su quella del fosforo dipende dalla resistenza termica tra questi ultimo e le sorgenti/PCB.

Il flusso luminoso e l'efficienza diminuiscono al crescere della temperatura di giunzione e del fosforo, come illustrato alla Figura 145<sup>70</sup>.



**Figura 145 Flusso luminoso vs temperatura del fosforo e della giunzione (a sinistra). A destra efficacia in funzione della temperatura del fosforo e della giunzione**

## 22.2 Variazioni di colore

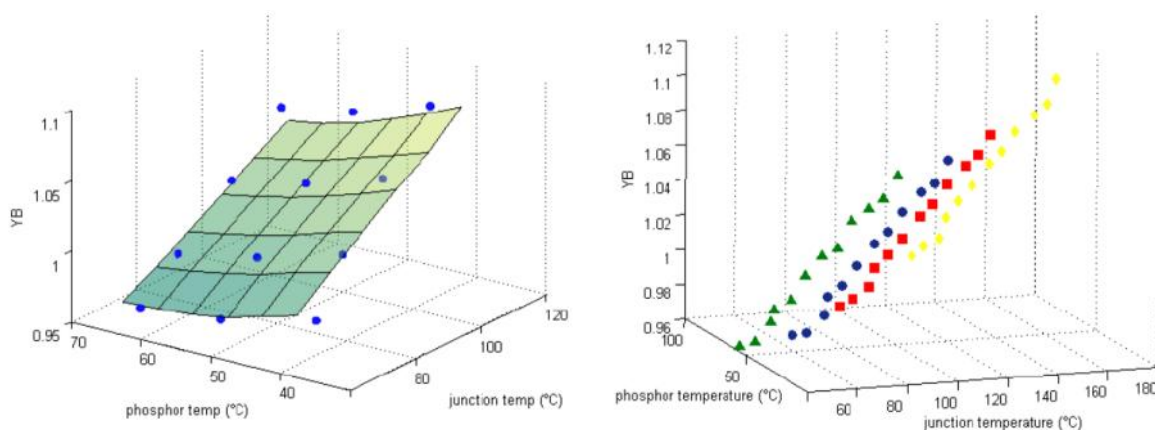
La variazione di lunghezza d'onda dominante dei LED blu (dovuta alla particolare selezione di LED scelti, oppure allo spostamento dovuto alla temperatura di giunzione), comporta uno spostamento delle coordinate cromatiche nello spazio CIE(x,y) 1931 rispetto alle coordinate ottenute nelle condizioni di riferimento (lunghezza d'onda dominante media 455 nm).

Una variazione di +1.25 nm nella lunghezza d'onda delle sorgenti blu, comporta che la cromaticità del bianco risultante sia all'interno di un ellisse di MacAdams pari a 4steps, una variazione di +-2.5 nm implica che l'ellisse sia pari a 5 steps.<sup>a</sup>

Sulla base delle considerazioni del precedente paragrafo, si può ragionevolmente prevedere il seguente comportamento:

- Aumento della componente YB (YB yellow-blu ratio of a phosphor-white spectrum) al crescere della temperatura di giunzione (diminuisce la potenza radiata dai LED blu)
- Diminuzione della componente YB con l'aumento della temperatura del fosforo
- Al crescere della corrente, la componente YB decresce

<sup>a</sup> Datasheets Intematix ChromaLit- Remote phosphor souce



**Figura 146 Legame tra percentuale di luce YB e la temperatura del fosforo e della giunzione**

Da queste semplici osservazioni si deduce che se il progettista vuole massimizzare il flusso luminoso emesso e l'efficienza luminosa, dovrà progettare un sistema in cui il fosforo e la giunzione dei LED lavorino alla più bassa temperatura possibile; questo si traduce con la realizzazione di un dissipatore di dimensioni sufficienti per la giunzione e nel cercare di ottenere una resistenza termica tra giunzione e fosforo la più grande possibile.

Se al contrario si desidera massimizzare la stabilità cromatica della luce emessa, occorre fare in modo che la temperatura del fosforo cresca più rapidamente di quanto non faccia la temperatura di giunzione: questo si traduce nell'ottenere una bassa resistenza termica tra giunzione e fosforo<sup>71</sup>.

Ne consegue che il designer di prodotto dovrà scegliere la propria priorità di sviluppo tra quelle citate.

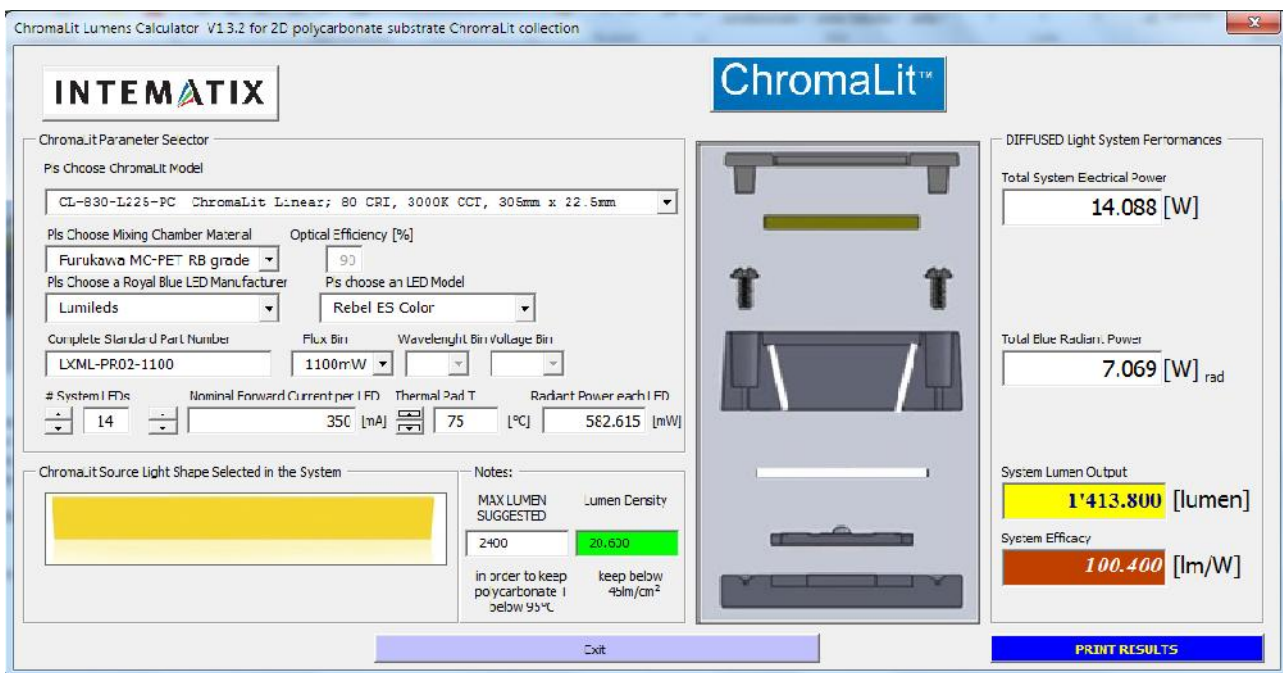
### 22.3 Dimensioni della camera di miscelazione e Disposizione dei LED

Per quanto riguarda la dimensione della camera, l'unico parametro di progetto è l'altezza, dal momento che le altre due dimensioni sono determinate dalle dimensioni del fosforo remoto prescelto e dal requisito progettuale di creare due differenti camere di miscelazione.

Le dimensioni del fosforo dovranno risultare compatibili con l'ingombro inizialmente ipotizzato nello sviluppo dell'ottica a riflessione e sufficiente a garantire il rispetto del limite di 45 lm/cm<sup>2</sup> (massimo teorico 2400 lm per un fosforo remoto lineare con supporto in policarbonato di dimensioni 305x22.5 mm con CRI 80 e temperatura correlata di colore di 3000K) al fine di garantire che il PC rimanga al di sotto del limite di 95°C.

La simulazione ottenuta con il foglio elettronico per il dimensionamento della camera predisposto da Intematix (Figura 147), fornisce i dati leggermente migliori rispetto alle ipotesi conservative riportate nella (Tabella 16): si ottiene infatti una stima 1413 lm rispetto a quella di 1331 lm, ipotizzata nella Tabella 16.





**Figura 147 Dimensionamento della camera di miscelazione mediante il foglio elettronico predisposto da Intematix**

Le principali differenze riguardano la tensione ai capi di ciascun LED, assunta pari a 2.87 V per la valutazione Intematix e 3 V per il calcolo iniziale (al crescere della temperatura di giunzione la tensione ai capi del LED diminuisce, ma i LED presentano un ampio intervallo di tensioni, se non viene ridotto attraverso una opportuna scelta del binning) e il valore di efficacia di conversione, assunto pari a 185 lm/W per il calcolo iniziale e pari a 199.87 per la stima mediante l'applicazione Intematix<sup>a</sup>.

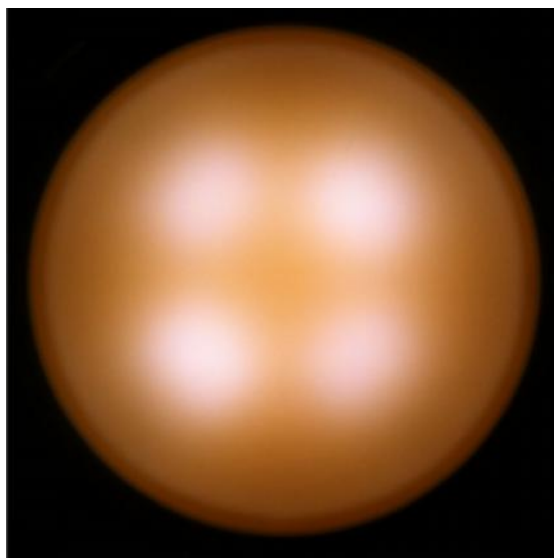
La disposizione dei LED all'interno di ciascuna camera di miscelazione dovrà garantire un elevato valore del rendimento della camera stessa e una buona miscelazione dell'emissione dei diversi LED: a tale scopo la superficie del PCB e le 4 pareti laterali della camera di miscelazione dovranno essere ricoperte con un materiale ad elevato fattore di riflessione (FURUKAWA MC-PET RB) e inoltre i LED dovranno presentare una interdistanza tale da irradiare nel modo più uniforme possibile la superficie del fosforo.

In generale, camere a basso profilo forniranno valori di efficienza (MCE) più elevati a scapito però dell'uniformità di luminanza della superficie del fosforo (Figura 148), che potrebbe essere un requisito critico in alcune particolari applicazioni.

Il costruttore del fosforo suggerisce di scegliere il passo tra i LED e l'altezza della camera di miscelazione in modo che l'intensità luminosa al 50% del massimo si sovrapponga con la massima emissione del LED adiacente (Figura 149).

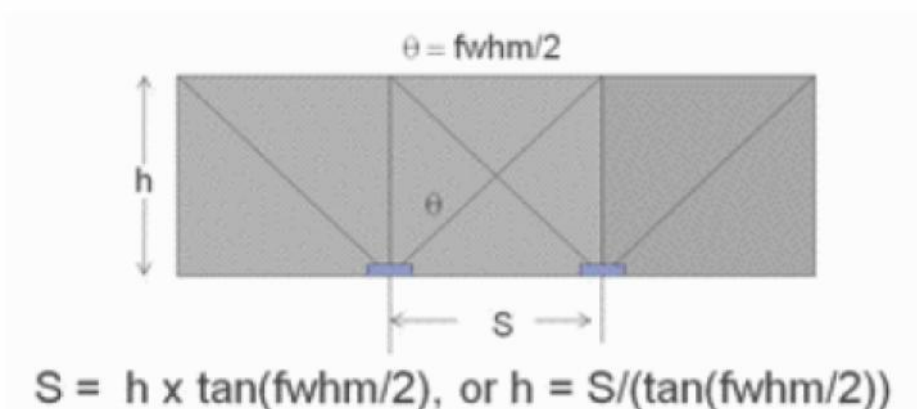
Nel nostro caso, l'apertura del fascio luminoso dei LED prescelti risulta pari a 125°, di conseguenza l'interdistanza tra i LED della fila risulta pari a 21 mm, avendo fissato il valore dell'altezza h pari a 11 mm (distanza dalla superficie del riflettore alla superficie di deposizione dei fosfori sulla lastra di PC).

<sup>a</sup> La differenza dipende dal valore di temperatura a cui si suppone si trovi il fosforo remoto



**Figura 148 Esempio di non uniformità di luminanza del fosforo remoto, probabilmente dovuto al particolare design della camera di miscelazione**

Nel progetto, riveste qualche interesse la possibilità di prevedere in modo accurato l'uniformità della superficie emittente del fosforo e analizzare l'uniformità cromatica della luce emessa dalla sorgente, con particolare interesse per le coordinate cromatiche nelle diverse direzioni .



**Figura 149 Legame tra Interdistanza tra i LED di una fila e altezza della camera di miscelazione**

Risultati più accurati sono raggiungibili disponendo di maggiori informazioni circa il comportamento del fosforo remoto, in particolare attraverso la modellazione della BSDFs (bidirectional scattering distribution functions). Di norma la BSDFs viene separata in due diverse componenti , la BTDFs (bidirectional transmittance functions) e la BRDFs (bidirectional reflectance functions).

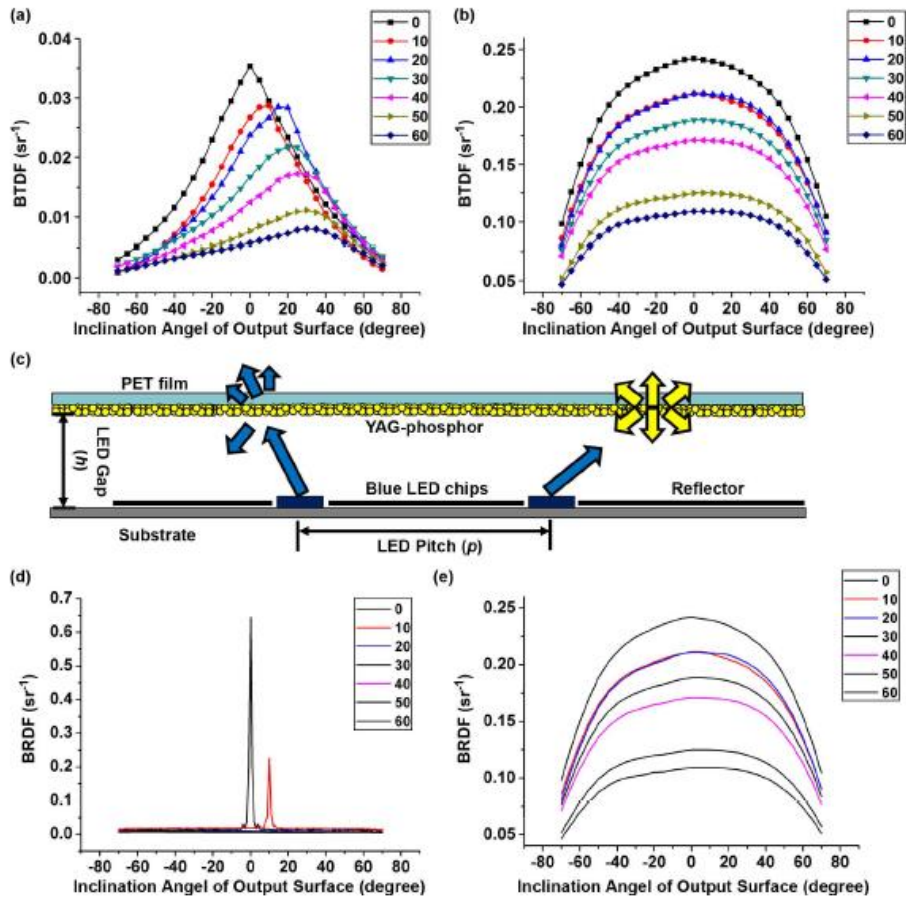
Queste informazioni sono reperibili in letteratura negli studi che trattano l'applicazione dei fosfori remoti alla retro illuminazione degli LCD, in modo da garantire valori molto elevati di uniformità di luminanza in spessori ridotti<sup>72</sup>.

Quando la luce emessa dai LED colpisce la superficie del fosforo remoto, parte della luce incidente è convertita in luce gialla, con distribuzione di tipo lambertiano<sup>73</sup> (Figura 150 (b)). La parte restante della luce blu incidente lascia il sistema e viene diffusa (Figura 150 (a)).

Si deve notare che i valori misurati di BTDF di un fosforo YAG:Ce<sup>3+</sup> riportati nella Figura 150 presentano una distribuzione angolare della luce gialla emessa molto vicina a quella lambertiana, a differenza di quanto accade per la luce blu che presenta una distribuzione molto meno ampia.

La luce riflessa all'interno della camera presenta una distribuzione angolare simile a quella riportata alla Figura 150 (e) e Figura 150 (e), che si riferiscono rispettivamente alla luce blu e a quella gialla.

Sfruttando opportunamente i dati di BTDFs e BRDFs, è possibile descrivere la luminanza della superficie di uscita del sistema in funzione della direzione di osservazione (descritta da due angoli  $\theta_t$ ,  $\phi_t$ ), al fine di trovare il migliore rapporto p/h (p: interdistanza, h altezza della camera), che massimizzi il rapporto tra il valore minimo della luminanza sulla superficie di uscita e il valore massimo.



**Figura 150 BTDFs misurati per : a) la componente diffusa blu che fuoriesce dal sistema; b) emissione verso l'alto di luce gialla convertita dai fosfori; c) meccanismo emissione della luce all'interno di un dispositivo con fosfori remoti; d) luce blu riflessa all'interno della camera; e) luce gialla convertita emessa verso l'interno della camera**

Lo schema di calcolo è quello illustrato alla Figura 151, dove sono indicati anche gli angoli che individuano la direzione di osservazione della superficie per la valutazione dell'uniformità di luminanza e quelli che indicano la direzione della radiazione blu incidente.

Sulla base delle simulazioni condotte dagli autori, si è ottenuto il grafico della Figura 152, dove si osserva che per valori bassi dell'altezza della camera e per valori elevati dell'interdistanza tra i LED, si ottengono valori pessimi di uniformità (45% circa), mentre al crescere del rapporto h/p, l'uniformità tende a migliorare sensibilmente.

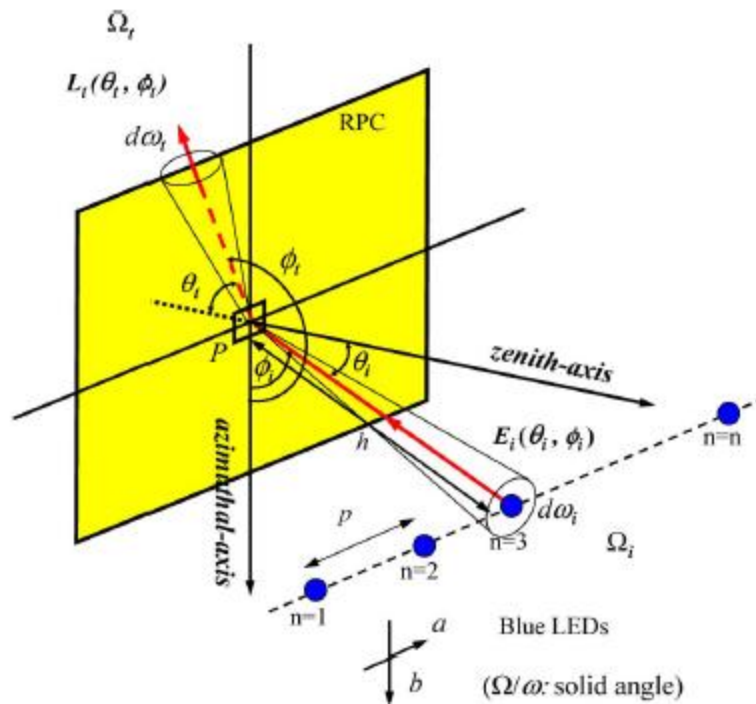


Figura 151 Calcolo della luminanza del fosforo remoto<sup>74</sup>

Le stesso modello potrebbe essere utilizzato anche per valutare l'effetto dell'altezza della camera di miscelazione sulla temperatura di colore: quando l'altezza  $h$  della camera di miscelazione aumenta, la quantità di luce gialla ottenuta da conversione diminuisce in misura maggiore rispetto alla componente di eccitazione della luce blu e di conseguenza diminuendo la percentuale di luce gialla in uscita, aumenta la temperatura correlata di colore della luce bianca emessa. Al crescere della dimensione  $h$  della camera, anche il valore di efficienza diminuisce molto rapidamente.

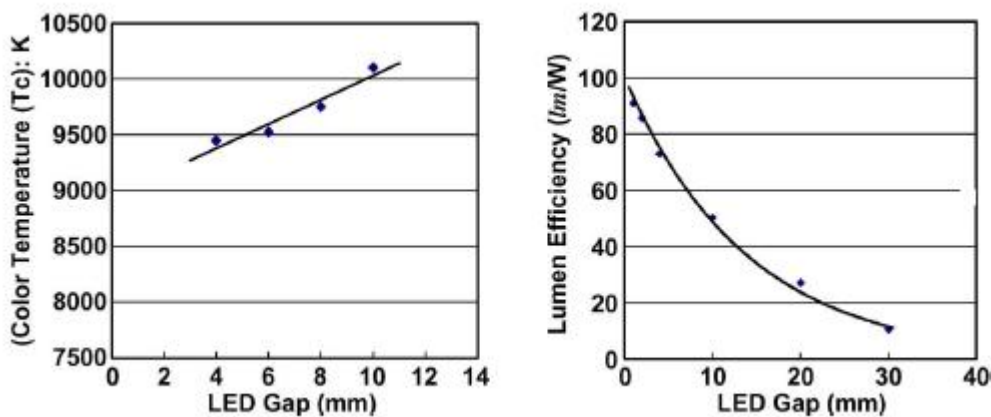


Figura 152 A sinistra è rappresentata la variazione della CCT in funzione del LED gap tra gli emettitori blu e il fosforo (LED Gap), a destra è rappresentato l'andamento tra l'efficienza luminosa e il LED Gap

### 22.4 Uniformità cromatica

In uno dei paragrafi precedenti, si è analizzata la distribuzione spaziale della componente blu e gialla attraverso la valutazione della BTDF attraverso il fosforo remoto, sulla base delle informazioni reperite in letteratura: la valutazione dell'uniformità cromatica e della variabilità del rapporto tra la potenza della componente gialla rispetto a quella blu, rappresenta il metodo di verifica delle informazioni della BTDF utilizzando i fosfori remoti del demo-kit Intematix.

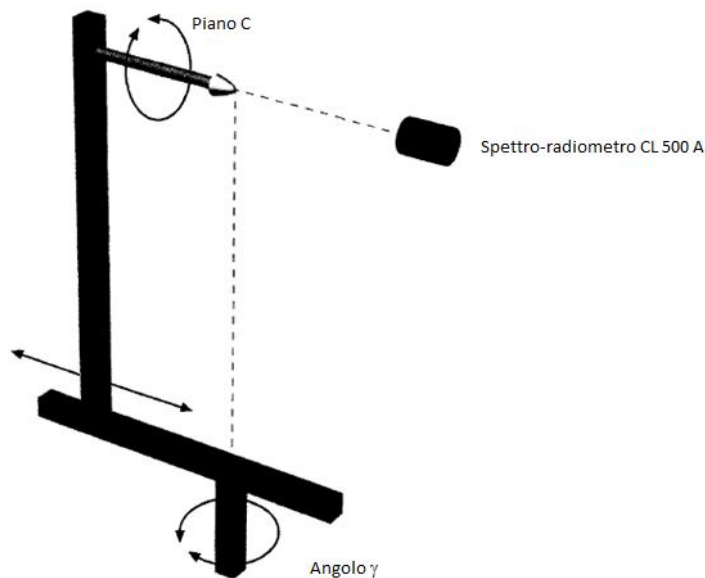
Le misure dei fosfori remoti sono state messe a confronto con analoghe effettuate su un COB Sharp Tiger Zenigata, sia per il canale del bianco caldo, sia per quello del bianco freddo.

Per coerenza con le misure condotte precedentemente sono state considerate due differenti temperature di colore per il sistema a fosfori remoti (3000K e 4000K), mentre per il COB sono state considerate le due temperature di colore che si ottengono alimentando un solo canale del dispositivo.

Il primo passo per valutare l'uniformità cromatica della sorgente a fosfori remoti è stata la misura della distribuzione delle coordinate cromatiche CIE(x,y) rispetto all'angolo  $\gamma$  di osservazione dell'emissione luminosa del singolo LED.

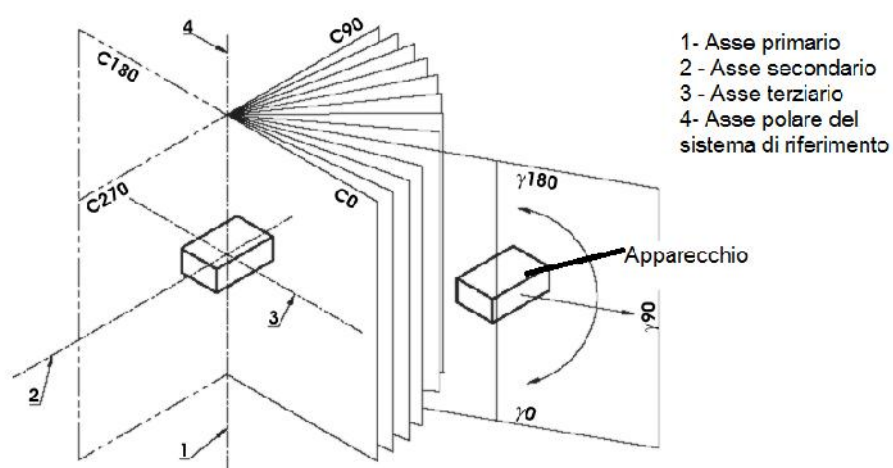
A tale scopo, un sistema costituito da un dissipatore di alluminio, dalla camera di miscelazione, dal PCB ospitante i LED blu e dal fosforo è stato montato nel centro fotometrico di un goniometro, capace di esplorare la distribuzione luminosa dell'apparecchio rispetto a due angoli (sistema di coordinate C- $\gamma$ ).

La Figura 153 mostra lo schema di principio del sistema di misura impiegato: la sorgente è stata posta nel centro di intersezione dei due assi tratteggiati, rivolgendo la propria emissione verso lo spettro-radiometro (Minolta CL-500).



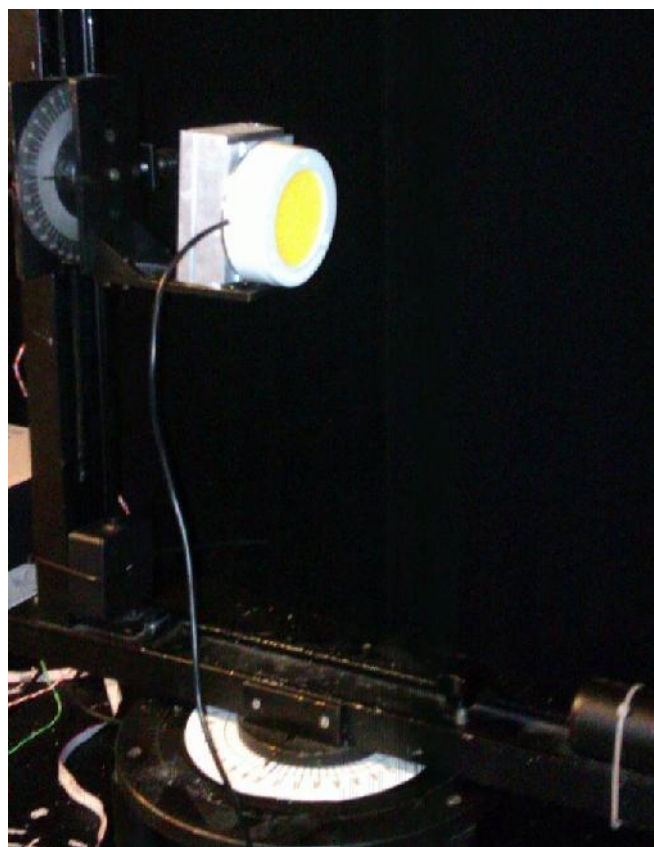
**Figura 153 Schema del Goniometro utilizzato per la misura dei singoli componenti dell'apparecchio**

La rotazione del sistema secondo i due angoli indicati in Figura 153, determina una serie di direzioni di esplorazione dell'emissione luminosa, rappresentate mediante il sistema di riferimento della Figura 154.



**Figura 154 Sistema di riferimento utilizzato per l'individuazione della direzione di emissione nello spazio da parte del LED**

La distanza di misura, che separa il centro fotometrico dallo strumento (Figura 155) di misura è pari a circa 0.97 m, superiore a 5 volte la massima dimensione dell'oggetto in prova che può quindi essere assunto puntiforme, commettendo un errore molto contenuto, nella valutazione dell'intensità luminosa.



**Figura 155 Sistema di misura visto dal lato dello spettro radiometro CL-500**

Le caratteristiche tecniche dello strumento di misura MINOLTA CL-500 sono riportate alla Tabella 17.

**Tabella 17 Caratteristiche dello strumento Minolta CL 500 (caratteristiche dichiarate del costruttore)**

<b>Modello</b>	<b>Spettrofotometro per misure di illuminamento e irradianza spettrale MINOLTA CL-500A</b>
<b>Classe Illuminamento</b>	Conforme alle disposizioni relative alla classe AA di JIS C 1609-1: 2006 "illuminante meters" Parte 1: Generalità strumenti di misura" * 1 Conforme alla DIN 5032 Classe B Parte 7
<b>Range lunghezza d'onda</b>	360 ~ 780 nm
<b>Uscita Passo lunghezza d'onda</b>	1 nm
<b>Passo lunghezza d'onda</b>	Approx. 10 nm (half bandwidth)
<b>Accuratezza lunghezza d'onda</b>	$\pm 0.3$ nm (Median wavelengths of 435.8 nm, 546.1 nm, and 585.3 nm <sup>2</sup> as specified in JIS Z 8724) <sup>3</sup>
<b>Range di Misura</b>	0.1 to 100,000 lx (chromaticity display requires 5 lx or more)
<b>Accuratezza Illuminante A) (Standard</b>	$E_v$ (Illuminance) : $\pm 2\% \pm 1$ digit of displayed value xy: $\pm 0.0015$ (10 to 100,000 lx) xy: $\pm 0.002$ (5 to 10 lx)
<b>Ripetibilità (2 ) (Standard Illuminante A)</b>	$E_v$ : 0.5% + 1 digit XY: 0.0005 (500~100,000lx) xy: 0.001 (100~500lx) xy: 0.002 (30~100lx) xy: 0.004 (5 ~ 30 lx)
<b>Risposta spettrale relativa nella regione del visibile, caratteristica (f1')</b>	$\leq 1.5\%$ of spectral luminous efficiency $V(\lambda)$
<b>Correzione al coseno (f2)</b>	$E_v$ : Entro 3%
<b>Deriva Termica (f<sub>T</sub>)</b>	$E_v$ : $\pm 3\%$ of displayed value; xy: $\pm 0.003$
<b>Deriva Umidità (f<sub>H</sub>)</b>	$E_v$ : $\pm 3\%$ of displayed value; xy: $\pm 0.003$
<b>Tempo di Misura</b>	Super Fast mode: Approx. 0.2 sec. (quando collegato al computer); Fast mode: Approx. 0.5 sec.; Slow mode: Approx. 2.5 sec.; Automatic exposure time setting (high accuracy) mode: Approx. 0.5 to 27 sec.

A partire dalla distribuzione spettrale misurata, sono state determinate le coordinate CIE(x,y) e la corrispondente valore della CCT per ogni direzione<sup>a</sup> angolare esplorata (4 semipiani C0-C180-C90-C270, ciascuno esplorato tra  $\gamma=0^\circ$  e  $\gamma=90^\circ$  a passo  $5^\circ$ ).

La misura è effettuata alla corrente di 250 mA, utilizzando un alimentatore lineare a corrente costante (ISOTECH), le cui caratteristiche tecniche risultano le seguenti:

- Tensione di uscita 0-40 V CC (risoluzione 10 mV)

<sup>a</sup> Per il calcolo, ci si è riferiti alla pubblicazione CIE 15: 2004

- Corrente di uscita 0~5 A (risoluzione in 2 mA)
- Regolazione tensione carico  $\leq 10$  mV
- Regolazione corrente carico  $\leq 5$  mA
- Regolazione tensione linea  $\leq 0.05\%$
- Regolazione corrente linea  $\leq 0.05\%$
- Tensione ondulazione  $\leq 20$  mV rms

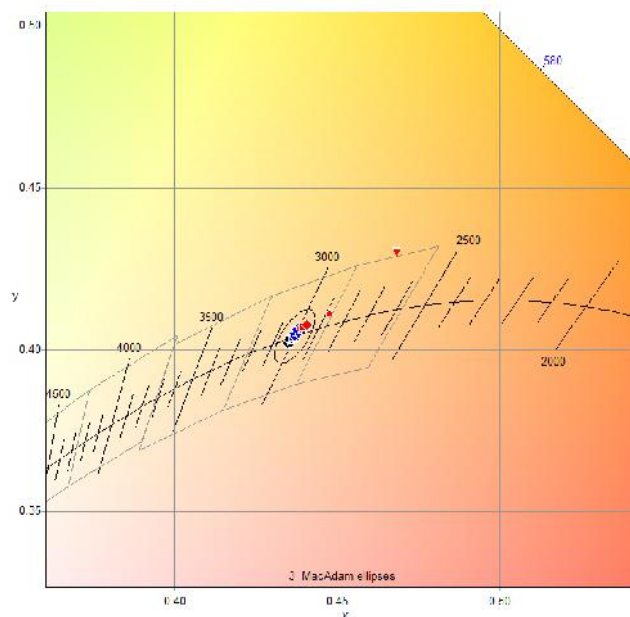
I risultati ottenuti per il fosforo CL830 sono riportati alla Tabella 18, dove si osserva che le percentuali di componente blu e giallo-verde rimangono pressoché costanti al variare dell'angolo  $\gamma$  di esplorazione. La buona prestazione in termini di uniformità cromatica dell'emissione del sistema è confermata anche dall'osservazione della Figura 156, dove sono state riportate le coordinate cromatiche nello spazio colore CIE x,y(1931) che si trovano concentrate all'interno di un'ellisse di MacAdam a 3 steps centrato su 3000K (si escludono due punti esterni all'ellisse che rappresentano effetti di bordo).

**Tabella 18 Distribuzione della percentuale di componente Blu rispetto a quella giallo-verde al variare dell'angolo di emissione della sorgente a 3000K (CL830)**

Ang. $\alpha$	Blu(%)	Y-G (%)	CCT	x	y
0	40.35	59.65	3018	0.4351	0.4018
5	40.37	59.63	3018	0.4351	0.4019
10	40.41	59.59	3022	0.4349	0.4019
15	40.25	59.75	3022	0.4351	0.4023
20	40.11	59.89	3017	0.4355	0.4026
25	40.02	59.98	3016	0.4357	0.4029
30	39.92	60.08	3011	0.4361	0.4031
35	39.75	60.25	3015	0.4363	0.4040
40	39.65	60.35	3009	0.4366	0.4039
45	39.51	60.49	3006	0.4370	0.4044
50	39.34	60.66	3004	0.4373	0.4048
55	39.31	60.69	3004	0.4375	0.4052
60	39.03	60.97	2998	0.4382	0.4057
65	38.94	61.06	2995	0.4385	0.4061
70	38.71	61.29	2993	0.4388	0.4065
75	38.50	61.50	2982	0.4396	0.4068
80	38.16	61.84	2970	0.4407	0.4076
85	35.91	64.09	2888	0.4476	0.4111
90	25.91	74.09	2728	0.4683	0.4294

La stessa misura è stata condotta sul fosforo CL840 (4000K) e risultati sono riportati alla Tabella 19: come ci si aspettava, la percentuale di componente blu è cresciuta rispetto al caso precedente, ma anche in questo caso i rapporti tra le due componenti si sono mantenuti pressoché immutati al variare dell'angolo di emissione.





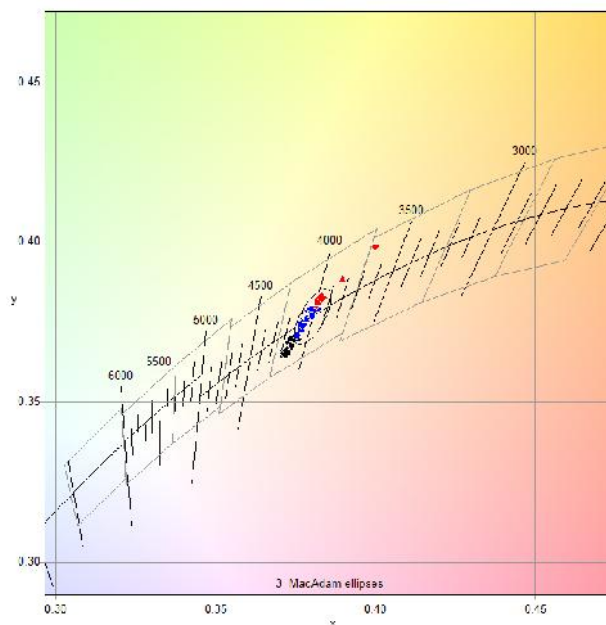
**Figura 156 Distribuzione delle cromaticità misurate nelle varie di direzioni di emissione all'interno dell'ellisse di MacAdam a 3 steps centrato su 3000K**

In questo caso tuttavia l'ellisse a 3 steps di MacAdams centrata sul luogo Planckiano a 4000K non colleziona completamente le cromaticità nelle varie direzioni di emissione (Figura 157); il comportamento potrebbe dipendere dalla minore concentrazione del fosforo (es. spessore di deposizione) che si è reso necessario per ottenere la nuova temperatura di colore.

**Tabella 19 Distribuzione della percentuale di componente Blu rispetto a quella giallo-verde al variare dell'angolo di emissione della sorgente a 4000K (CL840)**

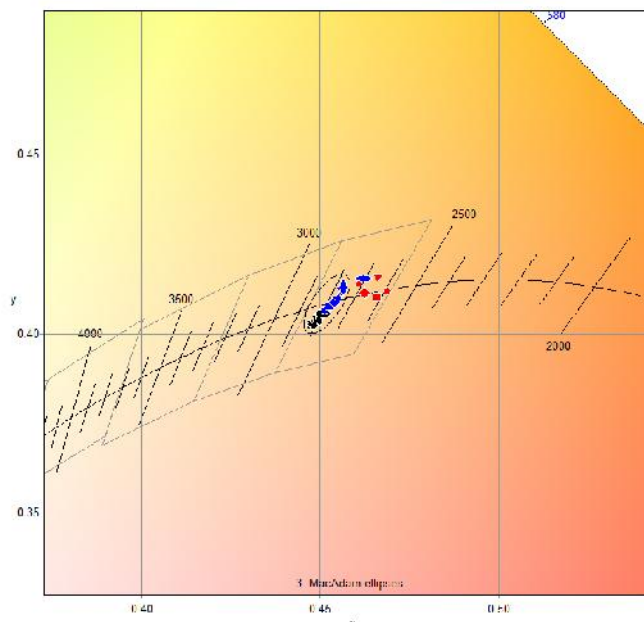
Ang. x	Blu(%)	Y-G (%)	CCT	x	y
0	49.86	50.14	4182	0.3715	0.3648
5	49.88	50.12	4185	0.3714	0.3650
10	49.85	50.15	4173	0.3719	0.3653
15	49.86	50.14	4166	0.3723	0.3662
20	49.88	50.12	4156	0.3729	0.3672
25	49.86	50.14	4133	0.3740	0.3685
30	49.85	50.15	4119	0.3748	0.3698
35	49.89	50.11	4102	0.3756	0.3709
40	49.86	50.14	4075	0.3771	0.3729
45	49.88	50.12	4079	0.3773	0.3744
50	49.86	50.14	4061	0.3782	0.3757
55	49.87	50.13	4042	0.3792	0.3769
60	49.81	50.19	4024	0.3802	0.3780
65	49.88	50.12	4007	0.3811	0.3791
70	49.83	50.17	4001	0.3816	0.3801
75	49.87	50.13	3990	0.3823	0.3812
80	49.82	50.18	3975	0.3833	0.3828
85	49.89	50.11	3854	0.3896	0.3881
90	48.03	51.97	3679	0.3999	0.3975

Possiamo comunque concludere che anche in questo caso l'uniformità cromatica della luce emessa dal sistema risulta ampiamente soddisfacente, per una applicazione relativa all'illuminazione di uffici.



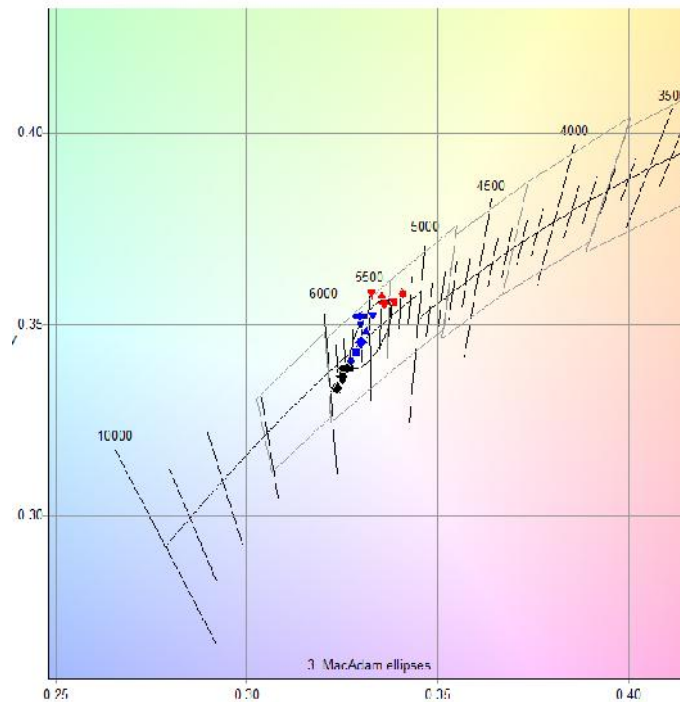
**Figura 157 Distribuzione delle cromaticità misurate nelle varie di direzioni di emissione all'interno dell'ellisse di MacAdam a 3 steps centrato su 4000K**

Come termine di confronto, per valutare la bontà dell'uniformità cromatica, sono state misurate le due emissioni del COB Sharp Tiger Zenigata, al variare dell'angolo di emissione rispetto all'asse ottico, impiegando la medesima strumentazione utilizzata per i rilievi precedenti. La Figura 158, mostra il risultato ottenuto per la tonalità calda e la Figura 159, mostra il risultato ottenuto per quella fredda.



**Figura 158 Distribuzione delle cromaticità misurate nelle varie di direzioni di emissione all'interno dell'ellisse di MacAdam a 3 steps centrato su 2800K**

Anche in questo caso, il risultato corrispondente alla CCT più elevata, presenta un maggior numero di punti al di fuori dell'ellisse di MacAdams, assunto come riferimento.



**Figura 159 Distribuzione delle cromaticità misurate nelle varie di direzioni di emissione all'interno dell'ellisse di MacAdam a 3 steps centrato su 5500K**

Le conclusioni che si possono trarre dai dati esposti è che la soluzione a fosfori remoti presenta un buon grado di uniformità cromatica indipendentemente dalla direzione di emissione (angolo formato tra la normale alla superficie emittente e la direzione di osservazione): le prestazioni migliori si hanno in corrispondenza alle tonalità calde rispetto a quelle fredde.

Il giudizio favorevole permane anche se si confrontano le performance con quelle di altre tipologie di dispositivi, come ad esempio i COB. Il comportamento supposto sulla base delle informazioni tratte dalla BTDF non si è verificato nel prototipo esaminato: questo è probabilmente spiegabile attraverso il differente range di temperatura di colore che le due applicazioni richiedono (CCT molto fredde per le applicazioni backlighting di display e caldo-neutre per applicazioni di office lighting).

## 23 Progetto del sistema a bianco dinamico mediante LED bianchi a conversione di fosforo

La soluzione prevede l'impiego dei due LED a differente temperatura di colore, al fine di ottenere un bianco dinamico tra gli estremi definiti dalle temperature di colore dei due LED utilizzati.

I LED utilizzati sono i Luxeon Rebel ES con due differenti temperature di colore 3000K e 5000K, che hanno come caratteristica principale quella di essere un dispositivo "freedom from binning", dal momento che il costruttore utilizza un processo produttivo che garantisce LED le cui cromaticità sono contenute in due ellissi di MacAdams da 3 steps o da 5 steps a seconda delle differenti esigenze di impiego.

Questa caratteristica rende i dispositivi molto simili a un FR, da punto di vista della selezione dei bin di cromaticità e costituisce quindi un buon termine di riferimento per la valutazione dell'efficienza delle diverse soluzioni dal punto di vista dell'efficienza luminosa.

Le caratteristiche fotometriche ed elettriche dei due LED sono riassunte nella Tabella 20.

**Tabella 20 Caratteristiche elettriche e fotometriche dei LED impiegati per la soluzione a bianco dinamico**  
**Luxeon Rebel PLUS** **Luxeon Rebel PLUS**

Modello	LX18P150Y				Modello	LX18P130Y			
CCT	5000	K	CRI min	80	CCT	3000	K	CRI min	80
Flusso Typ.	106	lm	@350 mA	Tj=85°C	Flusso Typ.	95	lm	@350 mA	Tj=85°C
FlussoTyp.	186	lm	@700 mA	Tj=85°C	FlussoTyp.	166	lm	@700 mA	Tj=85°C
Vf	2.76	V	@350 mA		Vf	2.76	V	@350 mA	
Vf	2.85	V	@700 mA		Vf	2.85	V	@700 mA	

L'impiego di tali LED in sostituzione dei LED blu (nella quantità di 2 file da 14 LED ciascuna), consente di ottenere i risultati riportati nella Tabella 21: in tale configurazione ciascun fosforo remoto è sostituito da un diffusore, come meglio spiegato nel seguito della relazione.

**Tabella 21 Caratteristiche elettriche e fotometriche dell'apparecchio**  
**Luxeon Rebel PLUS 5000K** **Luxeon Rebel PLUS 3000K**

Modello	LX18P150Y				Modello	LX18P130Y			
CCT	5000	K	CRI min	80	CCT	3000	K	CRI min	80
Flusso Typ.	106	lm	@350 mA	Tj=85°C	Flusso Typ.	95	lm	@350 mA	Tj=85°C
FlussoTyp.	186	lm	@700 mA	Tj=85°C	FlussoTyp.	166	lm	@700 mA	Tj=85°C
Vf	2.76	V	@350 mA		Vf	2.76	V	@350 mA	
Vf	2.85	V	@700 mA		Vf	2.85	V	@700 mA	
Rendimento app. completo NLED	0.71253				Rendimento app. completo NLED	0.71253			
Flusso apparecchio	1057.39	lm	@350 mA	Tj=85°C	Flusso apparecchio	947.66	lm	@350 mA	Tj=85°C
Flusso modulo	1215.40	lm	@350 mA	Tj=85°C	Flusso modulo	1089.27	lm	@350 mA	Tj=85°C
Pe	13.524	W	@350 mA		Pe	13.524	W	@350 mA	

Il flusso emesso dall'apparecchio sarà approssimativamente di 1000 lm per ciascuna delle due temperature di colore, quando ciascun circuito risulta alimentato alla corrente nominale di 350 mA e supponendo una temperatura di giunzione pari a 85°C.

## 24 Progetto | Modulo e sistema modulare: COEELO

### 24.1 Introduzione

L'Obiettivo progettuale, oltre all'alta efficienza energetica, è creare la possibilità di trasformazione e riappropriazione dello spazio di lavoro in ambito ufficio pur rimanendo nel quadro razionale standardizzato dello stesso: ogni utente può personalizzare il proprio posto di lavoro e ritrovare una condizione confortevole attraverso l'illuminazione. Il razionalismo dell'ufficio è riproposto in chiave dinamica e trasformabile con l'obiettivo di rompere con la monotonia delle tradizionali luci omologate da ufficio. La logica è quella di progettare un apparecchio di illuminazione in cui l'efficienza sia fondamentale ma anche il comfort abbinato ad un'esperienza personale dello spazio ufficio: **COEELO, COMfortable, EFFicient Experiential Lighting for Office.**

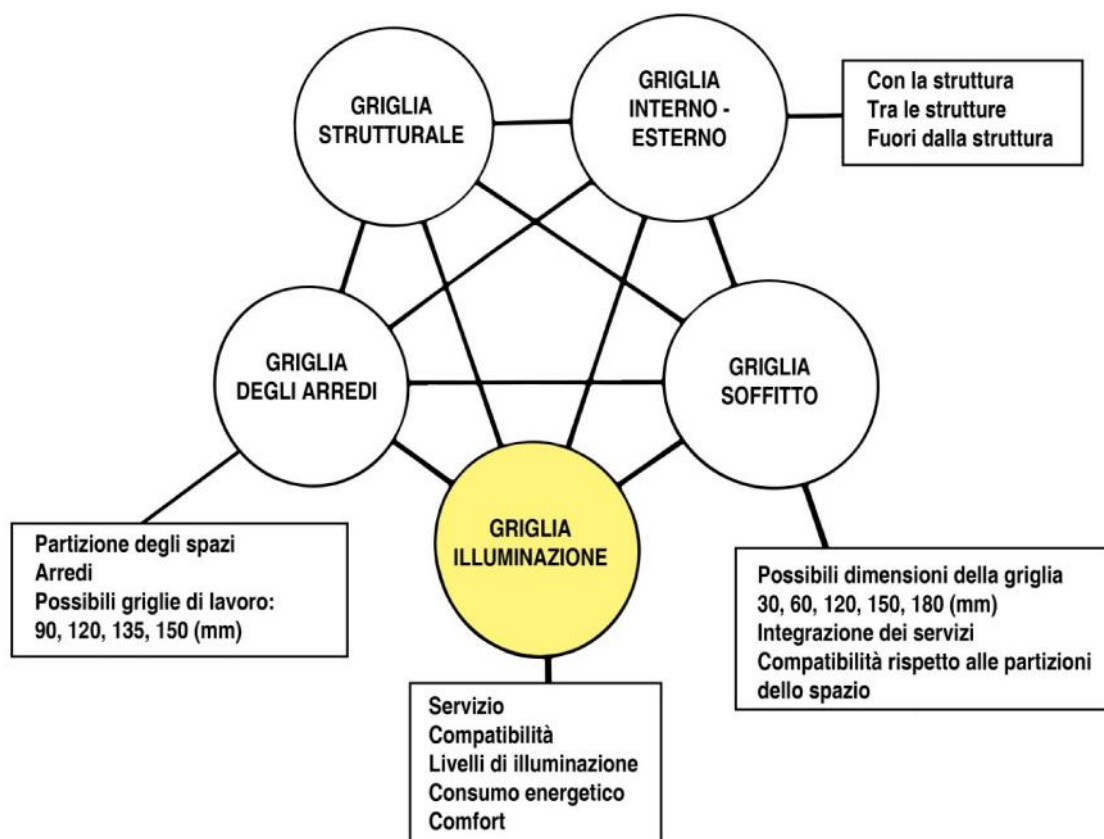


Figura 160 Sistema architettonico di un ufficio costituito da diversi layer funzionali e formali

Il sistema di illuminazione si inserisce in un ampio sistema architettonico fatto di spazi, di strutture, di zone di prossimità tra ambienti esterni ed ambienti interni, di arredi (tra cui l'elemento principale risulta la scrivania o il tavolo da lavoro) e il layer del soffitto che non è soltanto limite superiore della stanza da considerarsi ma anche elemento che solitamente include e nasconde gli elementi di funzionalità di base (come il trasporto dell'aria, dell'elettricità e della luce). In questo senso il riferimento più comune riguarda l'uso della copertura standard dei controsoffitti ispezionabili caratterizzati da pannelli 60X60.

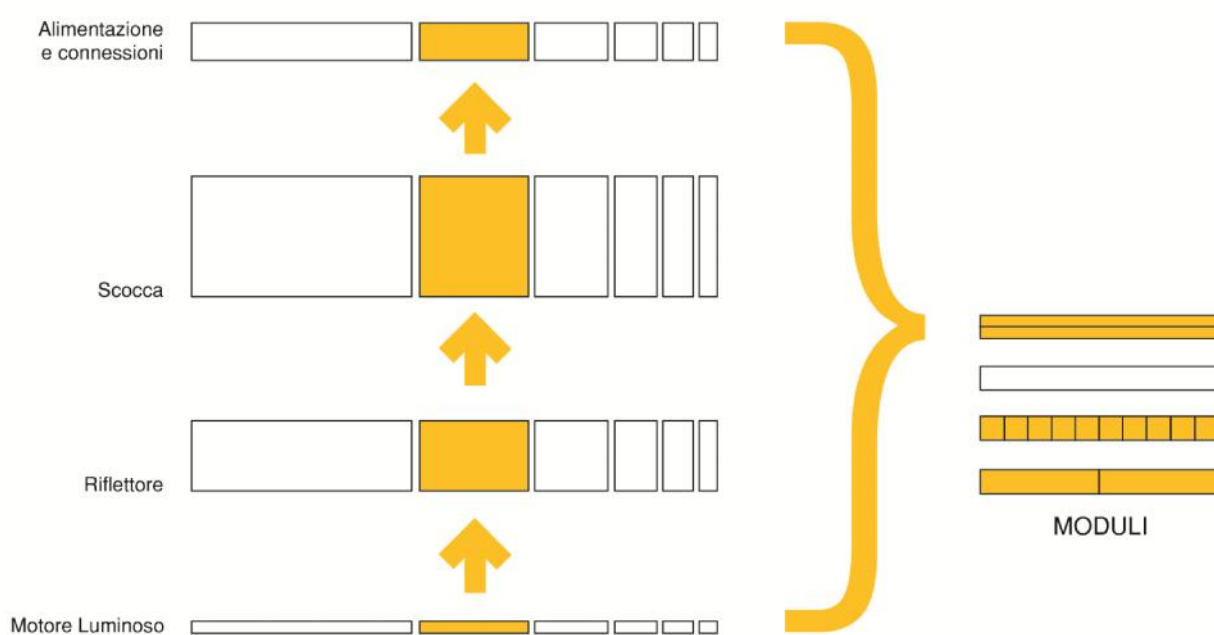
### 24.2 Overview | Modulo e sistema modulare

L'apparecchio da ufficio è stato disegnato a partire da un'idea di modularità, ovvero di un elemento singolo base che possa essere ripetuto e riconfigurato in diverse combinazioni al fine di assolvere diverse funzioni

di illuminazione (definite in base alle attività svolte, alle dimensioni della stanza e alle caratteristiche fisiche di montaggio in cui il prodotto possa essere configurato).

Partendo dalla scomposizione e ricomposizione funzionale di un apparecchio di illuminazione classico da ufficio (design by components) e prendendo in considerazione come elementi chiave la massima efficienza parallelamente al massimo comfort, si è concepito un prodotto di illuminazione caratterizzato da diversi blocchi logici funzionali:

- Motore luminoso con riflettore esterno (per un'illuminazione indiretta confortevole ad alta efficienza),
- Scocca di assemblaggio esterna (configurabile),
- Alimentazione e connessioni (montaggio a sospensione o inserita in un modulo 60 x 60)



**Figura 161 Blocchi logici funzionali del prodotto**

Tali elementi sono stati progettati in modo tale da poter essere facilmente riconfigurabili in maniera flessibile rispetto alle differenti necessità applicative. Inoltre la composizione di diversi elementi facilmente disassemblabili e sostituibili separatamente (in base al proprio ciclo di vita, all'evoluzione tecnologica e alle necessità di manutenzione) rende possibile la sostituzione di elementi durante l'uso e una migliore gestione del suo fine vita.

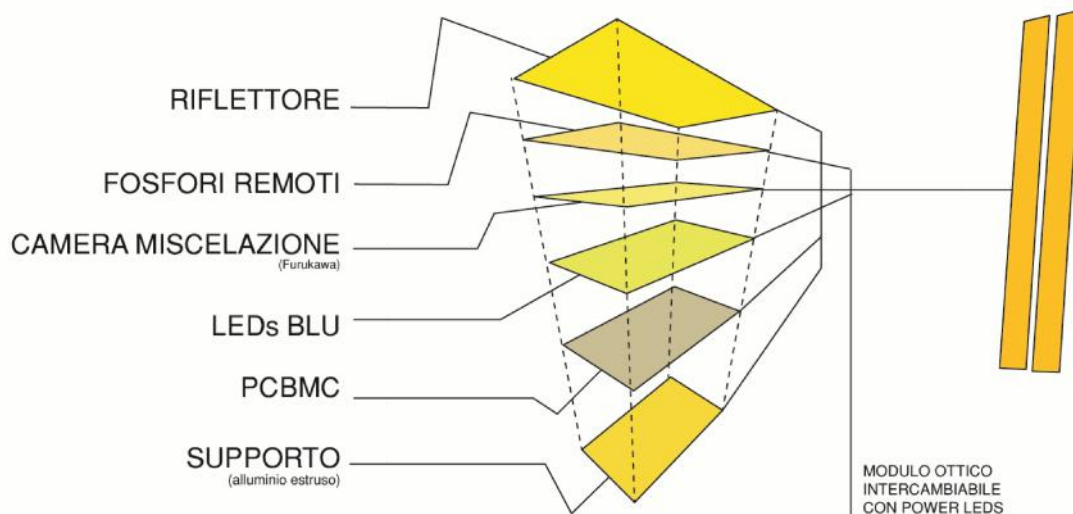
Per quanto riguarda il modulo del motore luminoso, ingombro e dimensione minima sono stati volutamente ricercati per ottenere un'alta performance insieme ad una forma minimale e poco impattante da un punto di vista visivo. Leggerezza e minimo spessore per un risparmio anche di materiali. Il motore luminoso è al contempo modulo ottico e termico con l'aggiunta del riflettore esterno, anch'esso progettato al fine di ottimizzare la performance luminosa con il minimo delle dimensioni.

Infine, il modulo stesso è stato pensato per poter essere equipaggiato con tecnologie diverse, a fosfori remoti oppure con white power LED in maniera da garantire diverse soluzioni più efficienti o più confortevoli oppure di permettere il continuo ricambio tecnologico data la costante evoluzione dei LED. Tale scelta permette di prolungare la vita dell'apparecchio senza modificarne il design.

Il sistema che determina la corretta illuminazione è caratterizzato da una serie di layer funzionali sovrapposti che contribuiscono alle performance ottiche (e termiche) ed è ridotto al minimo dei componenti e degli spessori utili alla funzionalità del sistema.

Alla base è posta una scocca in alluminio estruso che ingloba la tecnologia a fosfori remoti (ovvero LED BLU, camera di miscelazione diffondente grazie ad una lamina in MC-PET di Furukawa e una doppia selezione a Fosfori Remoti) e permette la dissipazione del calore generato dai LED. All'occorrenza tale scocca può ospitare power LED a differenti temperature di colore e da un diffusore in materiale plastico per la miscelazione delle due differenti emissioni luminose.

Nella parte superiore, il blocco logico di generazione e distribuzione della luce termina con un riflettore appositamente progettato per indirizzare la luce dove necessario in un contesto di lavoro in ufficio.



**Figura 162** Layers funzionali sovrapposti utilizzati per il concept e sviluppo del prodotto

### 24.3 Progetto | Dimensionamento geometrico del modulo

Si è proceduto a un dimensionamento di massima del modulo prendendo in considerazione prodotti standard in commercio per quanto riguarda il fosforo remoto e di conseguenza dimensionando la camera di miscelazione in modo tale da ottenere una corretta emissione sia per quanto concerne l'uniformità sul fosforo sia per l'angolo di emissione.

Lo stesso elemento è stato successivamente dimensionato per raggiungere la desiderata dissipazione termica dei LED (si è fissato  $T_j=75^\circ\text{C}$ ).

Nella parte superiore è inserito il riflettore tridimensionale studiato nelle minime dimensioni possibili al fine di ottenere un'illuminazione totalmente indiretta ma ad alta efficienza ed estremamente confortevole verso la superficie della scrivania ( $UGR<19$ ). Inoltre, il riflettore è funzionale alla corretta miscelazione della temperatura di colore dei fosfori remoti per favorire una uniforme illuminazione con bianco dinamico.

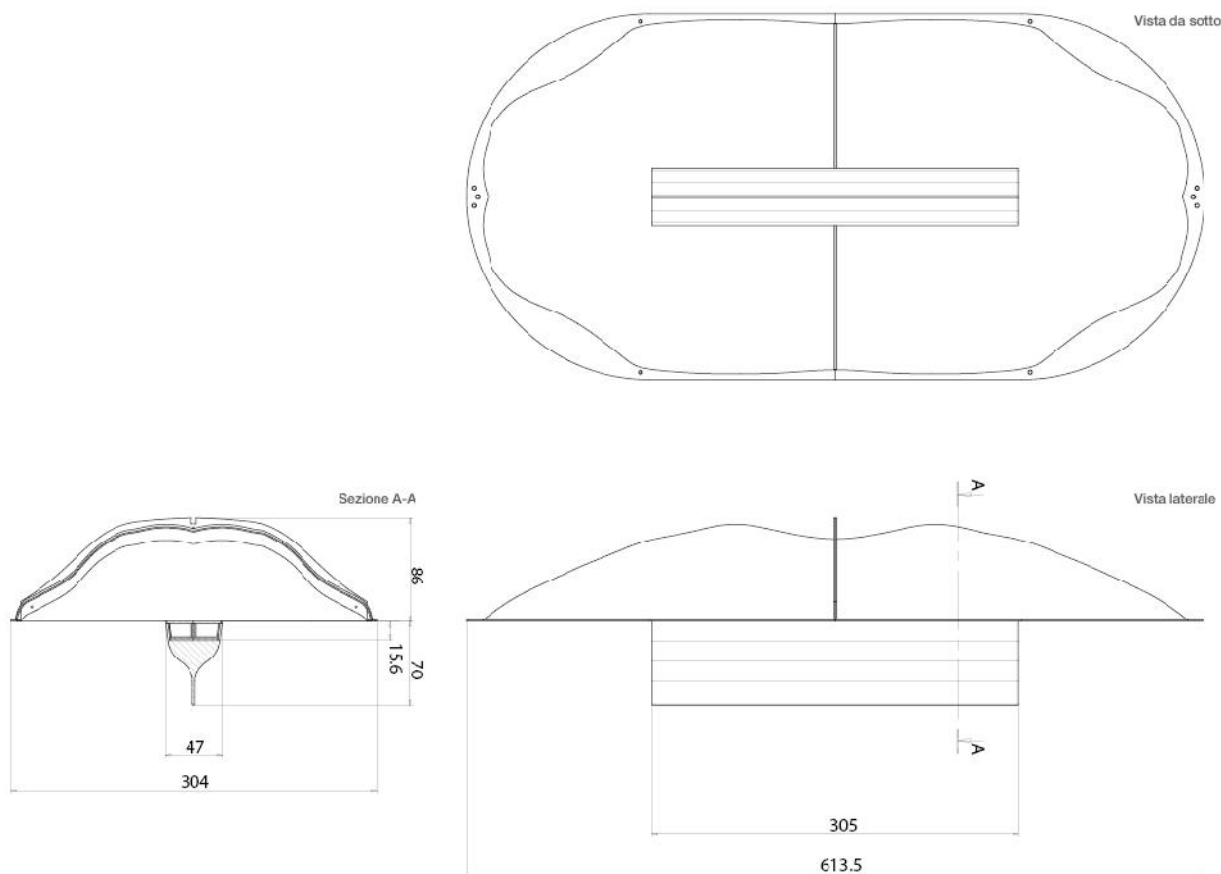


Figura 163 Dimensioni geometriche del modulo con indicati gli ingombri di massima in mm

#### 24.4 Progetto | Tecnologia a Fosfori Remoti: specifiche

Il motore luminoso segue un concetto di modularità e linearità, in maniera da realizzare un sistema prodotto che si adatti a diverse esigenze e applicazioni, in più contesti dimensionali e in layout di ufficio completamente diversi. La soluzione relativa al motore luminoso studiato prevede l'utilizzo di tecnologia a fosfori remoti che sia utilizzata per realizzare il bianco dinamico.

Vengono per questo motivo inseriti due fosfori remoti lineari a due temperature di colore diverse (3000K e 5000K) che, opportunamente miscelate, consentano la realizzazione del bianco dinamico. Si tratta di due fosfori remoti lineari Intematix ChromaLit™ (Dimensioni 305 x 22.5 mm) MODELLO CL830 LINEAR CCT 3000K Ra=80 e MODELLO CL750 LINEAR CCT 5000K Ra=70 (con possibilità di personalizzazione del fosforo per avere una Ra= 80)

La camera di miscelazione viene opportunamente divisa in due parti ed è completamente rivestita di un materiale altamente riflettente in MCPET prodotto da Furukawa (modello MCPET-RB).

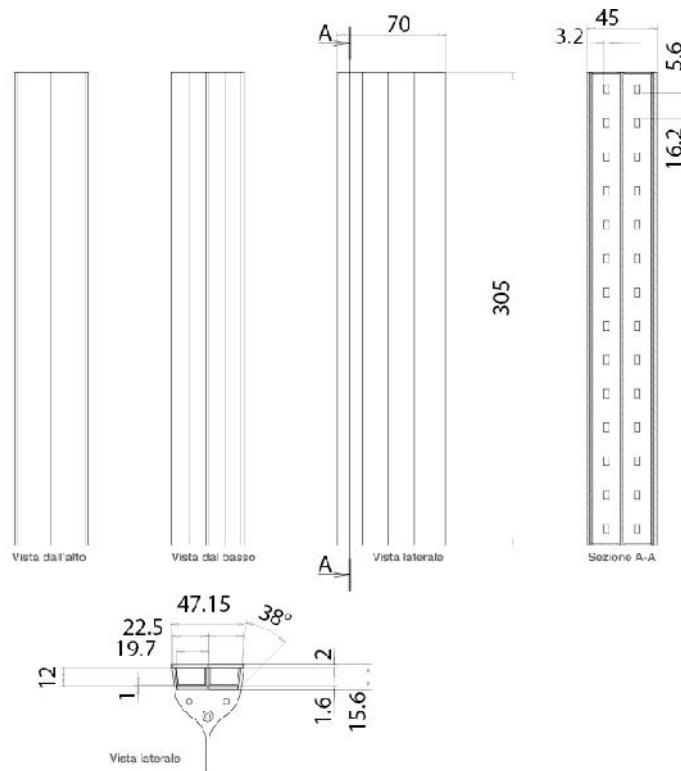
Le due camere di miscelazione, geometricamente identiche, sono equipaggiate con 14 LED blu ciascuna. I LED sono complessivamente 28 (2 file da 14 elementi ciascuna) LUXEON REBEL ES MODELLO LXML-PRO2 ROYAL BLU ( $\lambda_p=447.5$  nm,  $\Delta\lambda_{1/2}=20$  nm) con potenza radiante 1120 mW @ 700 mA,  $T_j=25^\circ\text{C}$ . Nel sistema progettato, la corrente di alimentazione risulta pari a 350 mA.

La camera che emette luce a CCT 3000K presenta un flusso di 1331 lumen (@ 350 mA,  $T_j=80^\circ\text{C}$ ), mentre quella con tonalità a 5000K produce un flusso luminoso pari a 1464 lumen (@ 350 mA,  $T_j=80^\circ\text{C}$ ).

Il modulo completo, quando equipaggiato con due fosfori identici, è capace di un flusso complessivo di circa 2600 lumen (a 3000K) derivato dal contributo delle due camere. L'efficienza di 80,63 lm/Watt (a 3000K) ad



una temperatura di giunzione di 75°C. La potenza complessiva del modulo risulta pari a 27.39 W (escluse le perdite del sistema di alimentazione).



**Figura 164** Dettaglio motore luminoso a fosfori remoti

## 24.5 Progetto | Soluzione tecnologica alternativa

In alternativa, lo stesso modulo (estruso di alluminio con funzione di dissipazione e MCPCB) è utilizzato per ospitare la tecnologia WHITE POWER LED (14 LUXEON REBEL PLUS MODELLO LX18P150Y CCT 5000K, con indice di resa cromatica  $R_a=80$  con un flusso di 106 lumen @ 350 mA alla temperatura di giunzione  $T_j=85^\circ\text{C}$  e 14 LUXEON REBEL PLUS MODELLO LX18P130Y CCT 3000K con indice di resa cromatica  $R_a=80$  con un flusso di 95 lumen @ 350 mA, alla temperatura di giunzione  $T_j=85^\circ\text{C}$ ).

I LED a luce bianca sono disposti su un MCPCB con lo stesso footprint del circuito che ospita i LED blu: alla massima corrente di alimentazione i 14 LED di tonalità calda emettono un flusso luminoso pari a 1330 lm, mentre per quelli alla temperatura correlata di colore di 5000K, l'emissione è di circa 1484 lm.

In questo caso la camera di miscelazione è unica ed è completamente rivestita dello stesso materiale altamente riflettente in MCPET prodotto da Furukawa (modello MCPET-RB). La parte superiore è costituita da un diffusore in Policarbonato (305 x 45 mm)

Il modulo completo (i due circuiti alimentati alla corrente di 350 mA) emette un flusso complessivo di circa 2000 lumen derivato dal contributo di 1089 lm per i LED caldi e da 1215 lm derivanti dai LED con tonalità fredda<sup>a</sup>. La potenza massima complessiva del modulo risulta pari a circa 27 W (escluse le perdite del sistema di alimentazione).

<sup>a</sup> Il valore esatto del flusso emesso dipende dal materiale diffondente utilizzato quale schermo di chiusura. Si è preferito quindi indicare un valore cautelativo come flusso emesso complessivamente dal modulo

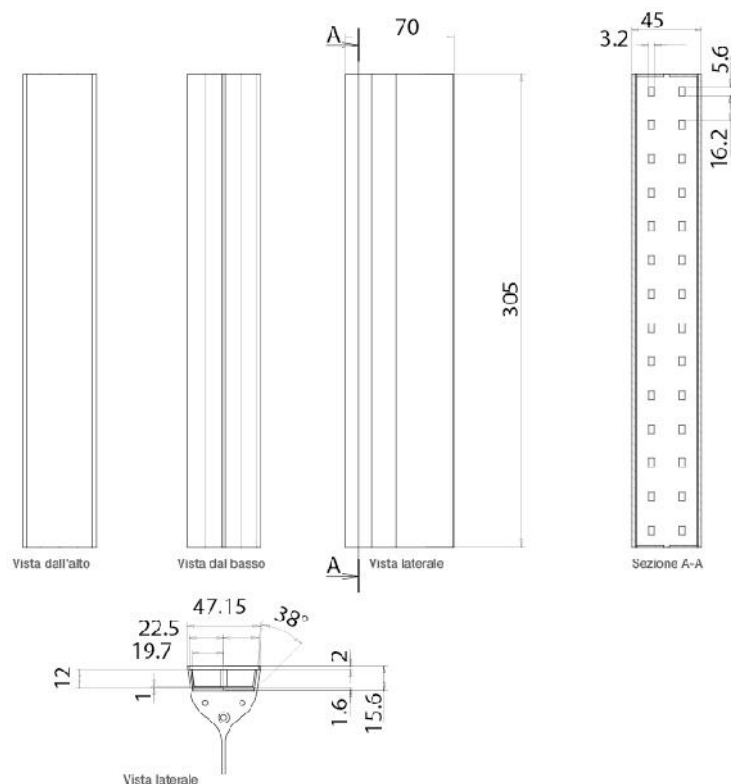


Figura 165 Soluzione alternativa con LED bianchi a differenti temperature di colore

## 24.6 Progetto | Dimensioni del modulo singolo COELO

Il modulo singolo è costituito da 4 componenti principali: il motore luminoso descritto nel precedente paragrafo, gli elementi di chiusura e connessione, il riflettore composto e il sistema di cover con attacco al soffitto (in cui vengono inseriti gli ausiliari elettrici).

Il dimensionamento della geometria, come precedentemente definito, deriva dalla riduzione complessiva di ingombri sia della camera di miscelazione dei LED sia del sistema di riflessione tridimensionale costituito da due superfici riflettenti realizzate in alluminio Sacall 106 HB di produzione Almeco.

Il modulo singolo COELO costituisce quindi un sistema di illuminazione indiretta ad alta efficienza che assicura contemporaneamente il comfort visivo e la miscelazione del bianco affinché sia dinamico durante le diverse ore della giornata.

Le sue dimensioni complessive sono: 613.5 x 304 e un'altezza di 160 mm.

## 24.7 Caratteristiche del modulo COELO singolo

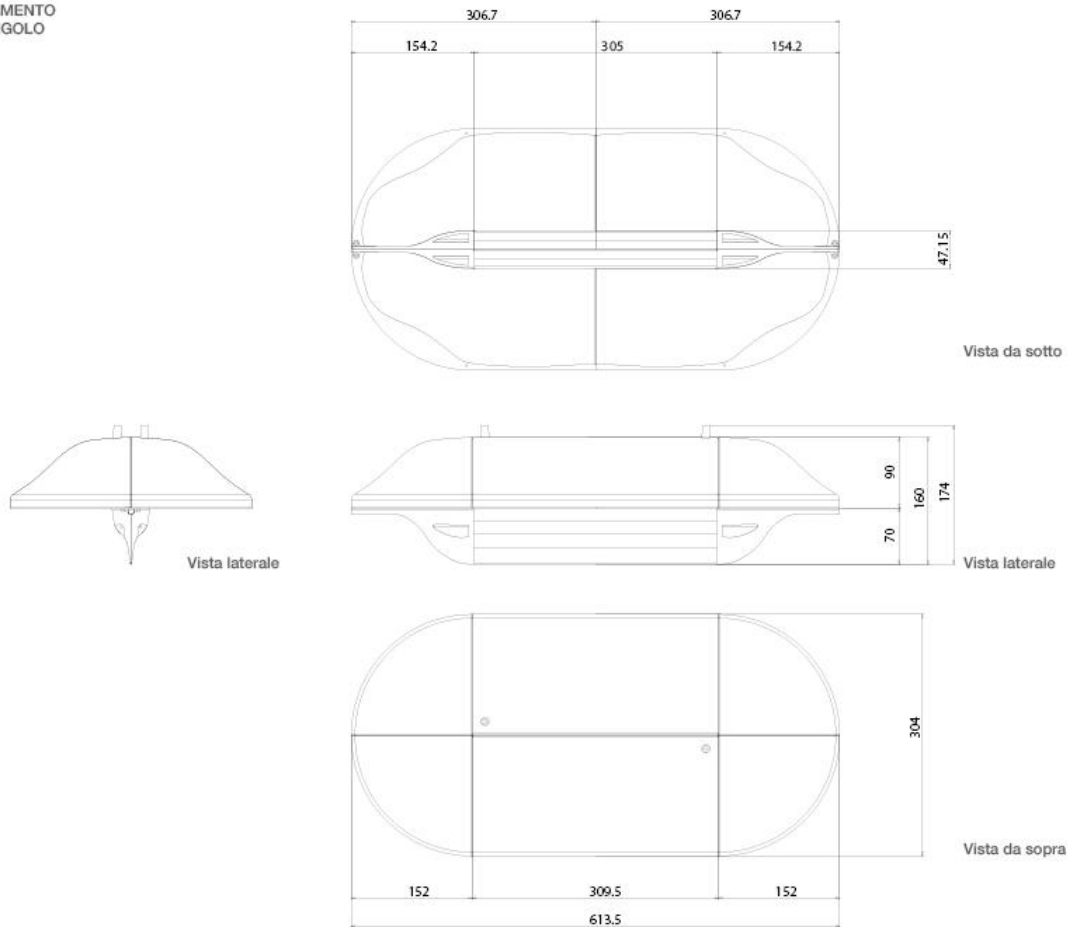
Il modulo presenta due elementi principali:

- il motore luminoso posto nella parte inferiore caratterizzato da dimensioni ridotte che funziona sia da supporto a diverse tecnologie LED, sia come elemento di dissipazione;
- il supporto superiore caratterizzato da riflettore e cover di rivestimento che è utile a determinare la corretta riflessione indiretta della luce e a consentire il montaggio dell'apparecchio a sospensione.

Dimensioni molto ridotte e "silenzio formale", guidano il design di un modulo formalmente minimalista in cui la riduzione dei materiali e l'utilizzo del minimo spessore (per quanto possibile) sono i tratti connotanti del componente.

Anche nel caso del dissipatore, il design è stato realizzato al minimo degli spessori disponibili realizzando una geometria che fosse minimamente impattante per la riflessione indiretta del LED e che sfruttasse geometricamente il moto convettivo dell'aria. Si è quindi ottenuta una forma che rende possibile una più efficiente ed efficace estrazione del calore dalla giunzione dei LED.

DIMENSIONAMENTO  
MODULO SINGOLO  
Scala 1:5  
Misure in mm



**Figura 166 Viste e dimensioni del modulo singolo COEELO**

I supporti laterali del motore luminoso, che verrà realizzato attraverso estrusione di alluminio, sono funzionali all'aggancio rispetto alla parte superiore dell'apparecchio e consentono allo stesso tempo il passaggio protetto e invisibile dei cavi di alimentazione elettrica del motore luminoso.

La cover superiore è stata frazionata in diverse parti (6) assemblabili tra di loro con dei giunti di plastica a partire da due soli elementi stampati che vengono combinati in maniera tale da assicurare diverse configurazioni e applicazioni (esempio: ospitare più motori luminosi, inserire in forma lineare o quadrata, etc...)

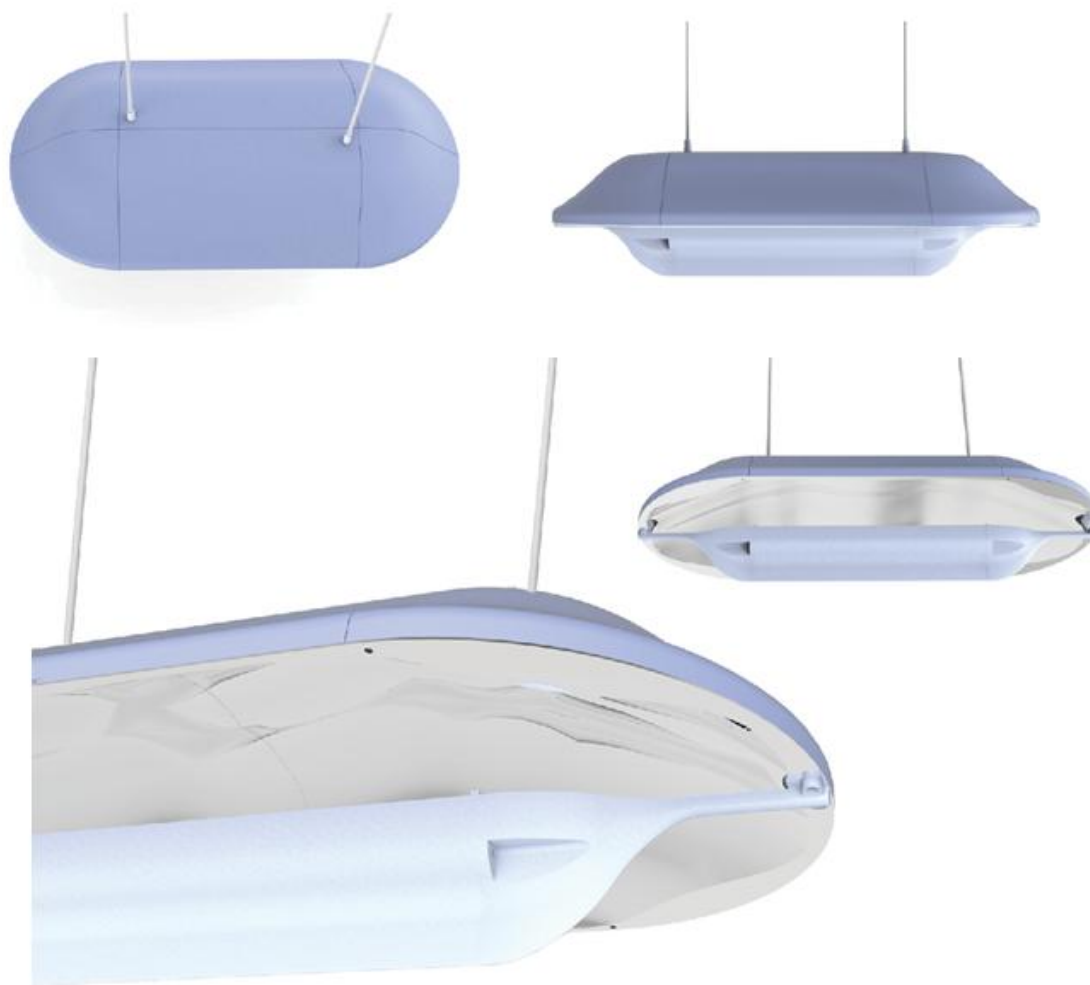


Figura 167 Rendering del modulo COELO singolo

#### 24.8 Progetto | Componenti del COELO singolo

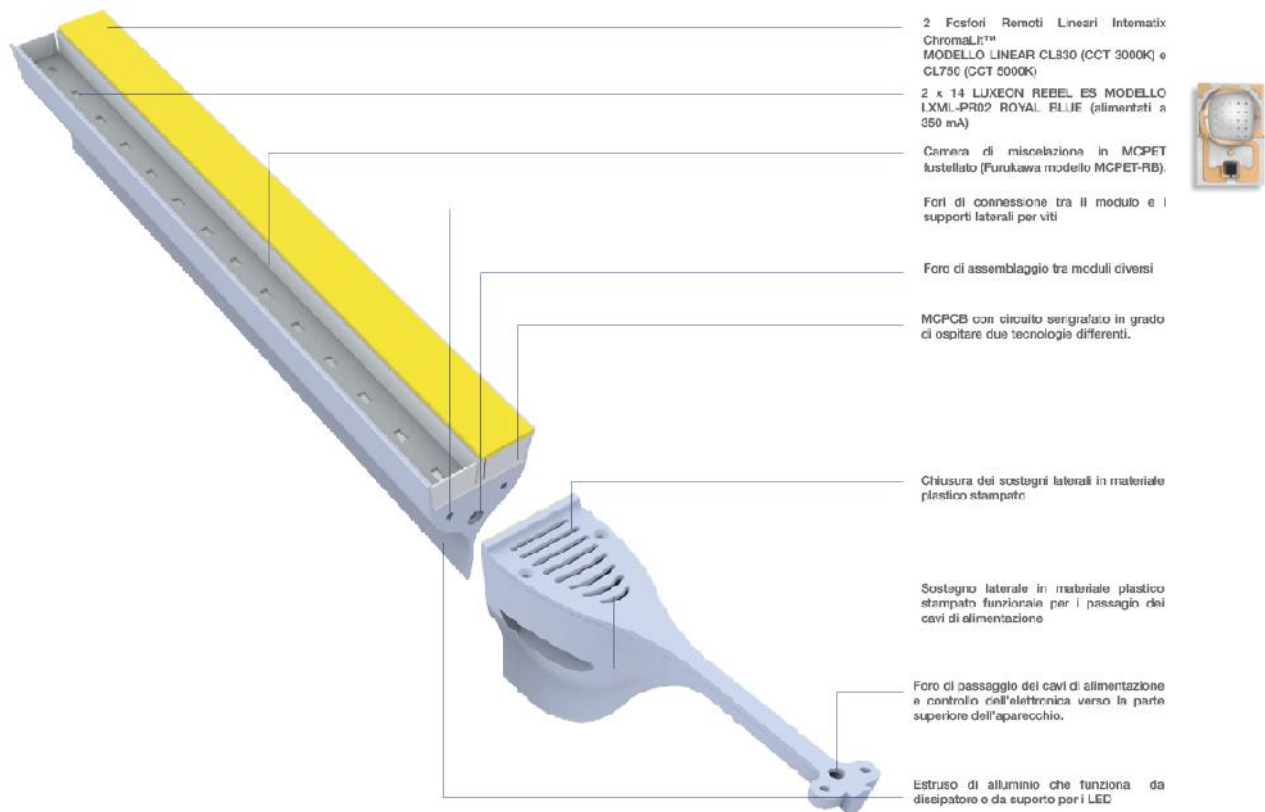
Il modulo singolo COELO è:

- termicamente dissipato,
- connesso con il sistema di alimentazione esterno;
- caratterizzato da due elementi utili all'illuminazione: motore luminoso e sistema di riflessione della luce;
- riconfigurabile in base alle esigenze.

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

- 28 LED,
- Camera di miscelazione (MC-PET Furukawa)
- Fosfori remoti
- Riflettore in due parti
- Cover di chiusura
- Due circuiti MCPCB per ospitare 2x14 LED,
- Connettori laterali

Nell'esploso si riportano le informazioni essenziali riguardanti il modulo relativo al motore luminoso.



**Figura 168 Esploso del motore luminoso e descrizione delle componenti principali**

Il modulo del motore luminoso a fosfori remoti è racchiuso all'interno di un supporto geometricamente studiato per la riduzione delle dimensioni e dell'impiego di materiale oltre garantire la corretta dissipazione termica dei LED.

L'elemento di supporto è completamente realizzato in alluminio estruso a cui si aggiungono successive post-lavorazioni per definire i fori di giunzione tra i moduli e/o tra moduli e connessione con l'elemento di riflessione superiore.

L'estrusione di questo elemento comporta la possibilità di realizzare apparecchi di illuminazione di diverse dimensioni (lunghezze) in modo da poter configurare l'apparecchio per diverse applicazioni.

L'alluminio è un materiale con buone proprietà meccaniche e di conduzione termica ed è completamente riciclabile a fine vita del prodotto.

Le dimensioni del motore luminoso sono 305 x 47.15 x 70 mm, con un volume di circa 262 cm<sup>3</sup>, mentre il peso stimato risulta di 709.4 grammi.

La tecnologia a fosfori remoti, una delle possibili soluzioni alternative per il motore luminoso, è caratterizzata da quattro componenti principali:

- I LED a luce blu (28 disposti su 2 file da 14) posizionati sul PCB in metalcore su cui è serigrafato il circuito di alimentazione; lo stesso MCPCB può eventualmente essere riutilizzato con una diversa tecnologia, ad esempio con white power LED a differente temperatura di colore.
- I LED emettono all'interno di una doppia camera di miscelazione ricavata dalla fustellatura e piegatura di un foglio MCPET fustellato ad elevata riflettanza (Furukawa modello MCPET-RB). Tale foglio presenta dei fori per l'alloggiamento delle sorgenti LED.

- Due fosfori remoti Lineari Intematix ChromaLit™ a due temperature di colore differenti: CCT 3000K e CCT 5000K (se desidero un sistema a bianco dinamico), oppure due fosfori remoti Lineari Intematix ChromaLit™ identici alla temperatura di color desiderata (3000K,3500K,4000K,5000K).

Il supporto ottico e di dissipazione viene connesso alla parte superiore (il riflettore) tramite due elementi che fungono da raccordo formale, da connessione meccanica delle due parti dell'apparecchio e da connessione elettrica per il passaggio dei cavi di alimentazione verso il soffitto.

Il supporto è caratterizzato da due parti, superiore ed inferiore, unite tramite viti di giunzione. I due elementi di connessione sono utili anche ai fini di una corretta dissipazione termica (per questo motivo sono state previste delle fessure per il ricircolo dell'aria calda). Inoltre, questa soluzione viene anche utilizzata per tenere compatta la struttura ottica (fosfori remoti e camera di miscelazione).

La parte superiore dell'apparecchio è funzionale sia alla riflessione della luce in maniera confortevole nello spazio ufficio, sia all'aggancio al soffitto (l'apparecchio è a sospensione) tramite cavi di sostegno e cavo per la connessione elettrica.



**Figura 169 Immagine del riflettore e della cover**

Il riflettore è caratterizzato da una doppia curvatura (longitudinale e trasversale) ed è composto di due parti perfettamente uguali unite tramite appositi giunti e/o viti.

Viene realizzato in alluminio altamente riflettente tramite imbutitura e successive post-lavorazioni come la creazione di fori per il passaggio delle viti e il taglio laser dei bordi.

La geometria del riflettore è stata studiata per indirizzare la luce sul piano della scrivania con elevato DLOR e minimizzando l'abbagliamento.

La parte superiore del riflettore è coperta da una cover in plastica stampata caratterizzata da diversi moduli che vengono composti e assemblati in modo da poter realizzare diverse forme di apparecchio.

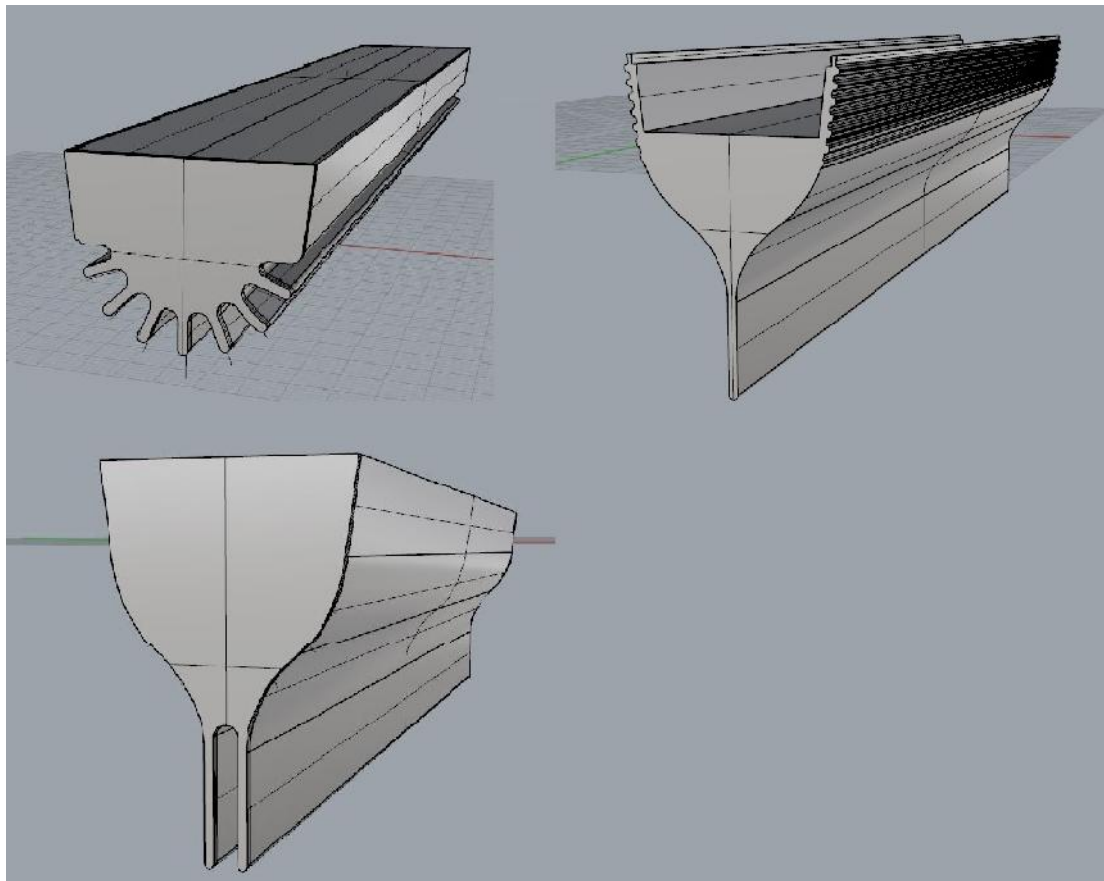
In particolare, due sono gli elementi di questa cover ad essere combinati: la parte lineare e la parte laterale curva. Attraverso opportuni giunti e snap fit di connessione, tali parti vengono collegate tra loro per avere un carter non solo estetico ma anche funzionale al passaggio nascosto dei cavi di alimentazione.

A tale elemento vengono fissati cavi di sospensione che collegano l'apparecchio al soffitto (in cui è disposto il vano ausiliari elettrici).

#### **24.9 Progetto | Dissipazione termica**

Al fine di dimensionare correttamente il sistema di dissipazione del modulo COEEO singolo, sono state effettuate diverse simulazioni termiche con lo scopo di studiare un sistema di smaltimento del calore che fosse allo stesso tempo efficiente e di dimensioni contenute, al fine di minimizzarne l'impatto visivo.

La Figura 170 mostra alcune delle soluzioni esaminate, che differiscono per numero, forma e disposizione delle alettature del modulo ottico.



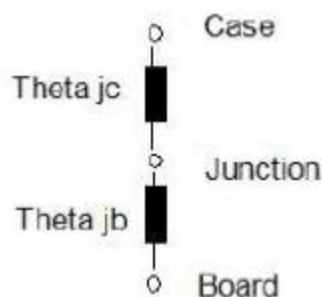
**Figura 170** Proposte esaminate per la definizione del dissipatore del motore luminoso

Dopo una serie di simulazioni termiche si è arrivati alla definizione di un dissipatore caratterizzato da una sola aletta<sup>a</sup> che sfrutti appieno il movimento dell'aria: la versione finale del dissipatore progettato mostra un'altezza complessiva pari a 70 mm e una lunghezza totale di 305 mm.

Il dimensionamento termico del modulo è stato effettuato tenendo conto della soluzione a bianco dinamico che impiega due LED a conversione di fosforo e in particolare, si è supposto che tutti i LED (2x14 LED) siano bianchi caldi con funzionamento al 100% della corrente di alimentazione (350 mA).

Il LED considerato (Luxeon REBEL PLUS) presenta una resistenza termica equivalente pari a 9.0 °C/W<sup>b</sup>, ciascun componente è stato modellato come un volumetto di dimensioni 4.61x3.17x2.10mm.

Solo la faccia del volumetto a contatto con il PCB viene suddivisa in mesh dal programma di simulazione fluido-dinamica per le quali viene calcolata la distribuzione di temperatura ad ogni iterazione di calcolo.



**Figura 171** Modello termico del LED

<sup>a</sup> Accanto a considerazioni di efficienza termica, è stato anche valutato l'impatto estetico sul prodotto delle diverse soluzioni proposte

<sup>b</sup> Si riferisce alla soluzione con LED bianchi a conversione di fosforo, come illustrato meglio nel seguito della relazione

Il componente **Theta j<sub>c</sub>** rappresenta la resistenza termica tra la giunzione e il case del componente (il suo valore 1000 C/W non è molto critico, il suo scopo è quello di assicurare che il calore si diriga prevalentemente verso il MCPCB e non verso il corpo del dispositivo). **Theta J<sub>b</sub>** rappresenta invece la resistenza termica tra la giunzione e il PCB.

Il primo passo è stato quello di determinare la potenza (W) da associare a ciascun LED nella simulazione termica, tenendo conto del fatto che parte della potenza elettrica assorbita non viene convertita in calore, ma produce radiazione visibile.

Sulla base della distribuzione spettrale del LED bianco caldo scelto, a ciascun LED è stata attribuita una potenza di 0.71<sup>a</sup> W da dissipare in calore.

In questa particolare condizione, si è verificato che tutte le temperature di giunzione siano comprese tra 75 e 80 °C: in questo modo, in tutte le altre condizioni di funzionamento previste per l'apparecchio, le temperature di giunzione saranno certamente inferiori al limite di progetto prefissato (75-76°C).

Il modello del PCB utilizzato per la simulazione termica del modulo ottico, è riportato alla Figura 172: è costituito da uno stato di alluminio, da un dielettrico e da un piano di rame che è utilizzato per la realizzazione delle connessioni elettriche tra i vari componenti elettronici.



**Figura 172 Sezione metal Core PCB utilizzato per la simulazione termica**

Il programma di simulazione termica utilizzato necessita la conoscenza di due valori di conduttanza termica: conduttività termica normale (K-normal) e sul piano (K-in-plane).

Le caratteristiche termiche del PCB utilizzato per la simulazione (utilizzato anche per i precedenti progetti ENEA), sono riassunte dalla Figura 173: è stato quindi creato un materiale all'interno del software di simulazione del tipo PCB, equivalente dal punto di vista termico (valori delle conduttanze k-in-plane e k-normal ai valori riportati nella figura indicata).

Al fine di considerare il caso pessimo, il valore di k-normal è stato ridotto a 0.002042 W/mmK al fine di considerare qualsiasi interfaccia termica e una finitura superficiale del dissipatore non ottimale.

Layer	t (spessore mm)	k (layer conductivity) W/m K	C (metal contenet) (%)	Descrizione		
1					0	0
2	0.04	398	70.00	Top layer copper	0.011144	1.43575E-07
3	1.02	150	98.00	Al plate	0.14994	6.93878E-06
4	0.55	2.27	98.00	dielettrico	0.001224	0.000247235
5					0	0
6					0	0
7					0	0
8					0	0
9					0	0
10					0	0
Spessore totale (mm)	1.61				0.162308	0.000254318
N (number of layer)	3					
E (coverage exponent)	1	Vale 1 o 2				
Kin-plane	100.8121304	nel piano di conducibilità	W/mK			
Kin-plane	0.10081213	nel piano di conducibilità	W/mmK			
Knormal	6.330661659	ortogonale al piano	W/mK			
Knormal	0.006330662	ortogonale al piano	W/mmK			

**Figura 173 Caratteristiche termiche del metal core PCB**

<sup>a</sup> Il valore risulta sovrastimato, perché calcolato considerando una caduta di tensione di circa 3 V sul LED (alla temperatura di giunzione di 85°C, per una corrente di 350 mA, il costruttore dichiara un valore inferiore della caduta di tensione sul dispositivo, pari a circa 2.76 V



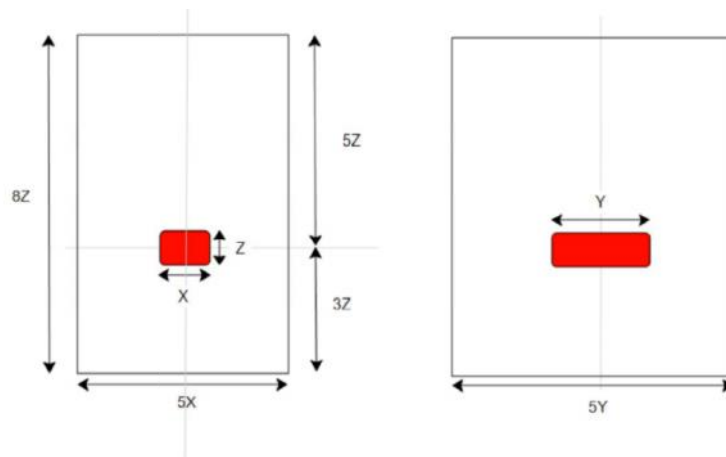
Le prestazioni termiche di molti dispositivi di raffreddamento passivo dipendono dall'interazione con l'ambiente esterno. Nei dispositivi passivi l'estrazione del calore avviene attraverso il naturale movimento di aria esterna al dispositivo: per simulare questa interazione, occorre quindi considerare una regione d'aria che avvolga completamente il dispositivo in esame.

Nel nostro caso la schematizzazione più vicina alla realtà fisica sarà quella definita Air-mounted, in cui il dispositivo è montato lontano da confini fisici, come ad esempio su un palo o ad un filo (questa disposizione è talvolta chiamata configurazione a "camino").

Le superfici superiore e inferiore sono aperte, l'aria entra dal basso ed esce attraverso la parte superiore, dopo aver sottratto calore al dispositivo.

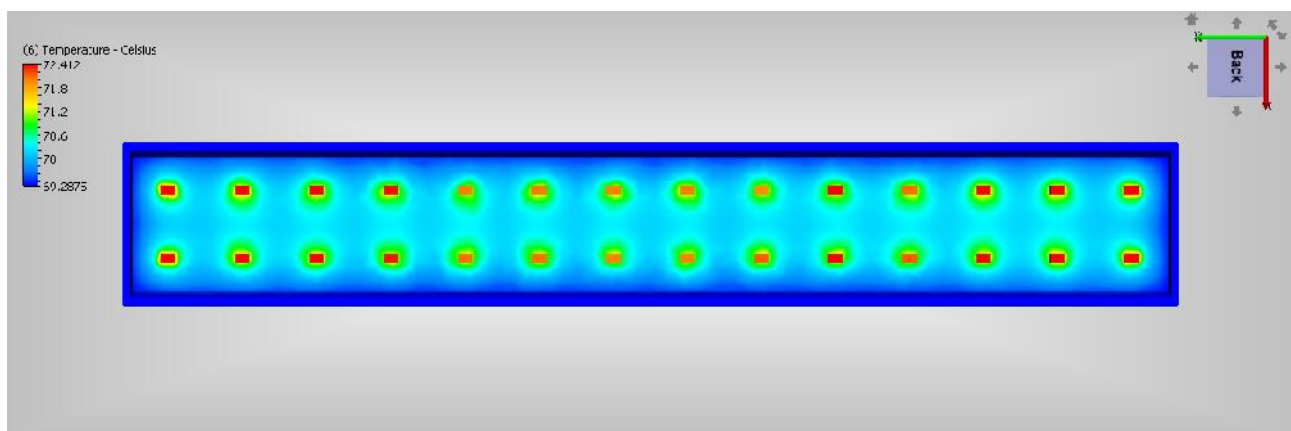
Le dimensioni minime del volume di controllo in funzione delle dimensioni dell'apparecchio da simulare sono mostrate alla Figura 174; le condizioni al contorno imposte sono solo due:

- Nessun differenziale di pressione tra la faccia superiore e inferiore del volume di controllo
- Temperatura della faccia inferiore pari a quella ambiente (25°C per tutte le simulazioni condotte)
- Le proprietà fisiche del volumetto d'aria contenuto all'interno del volume di controllo saranno variabili a seconda della propria temperatura

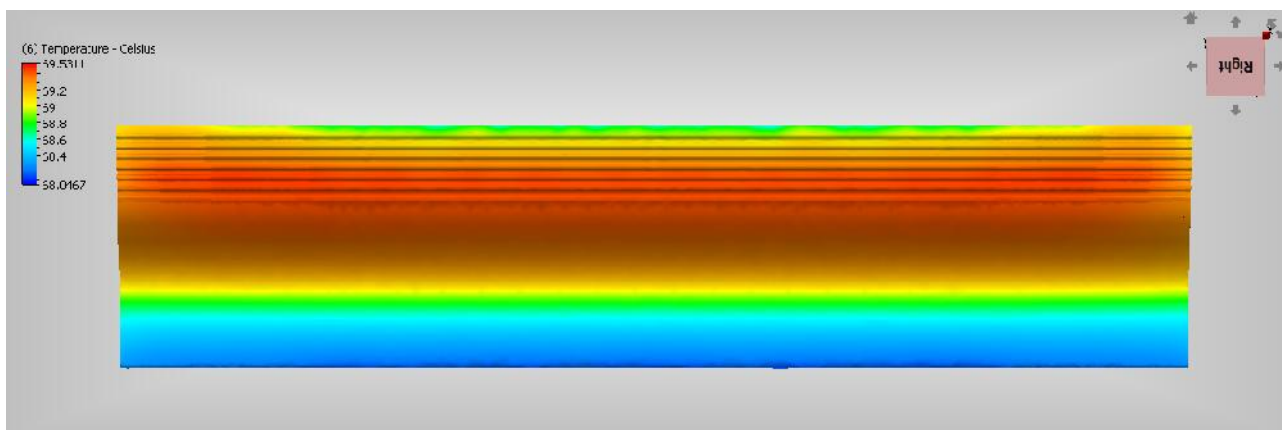


**Figura 174 Dimensione del volume di controllo in rapporto alle dimensioni dell'apparecchio di illuminazione**

I risultati della simulazione, relativi alla soluzione che impiega due LED bianchi a differente tonalità, sono riportati alla Figura 175 e alla Figura 176.



**Figura 175 Simulazione termica motore luminoso equipaggiato con Luxeon REBEL PLUS: vista MCPCB**



**Figura 176 Simulazione termica motore luminoso equipaggiato con Luxeon REBEL PLUS: dettaglio della distribuzione della temperatura sul profilo alettato**

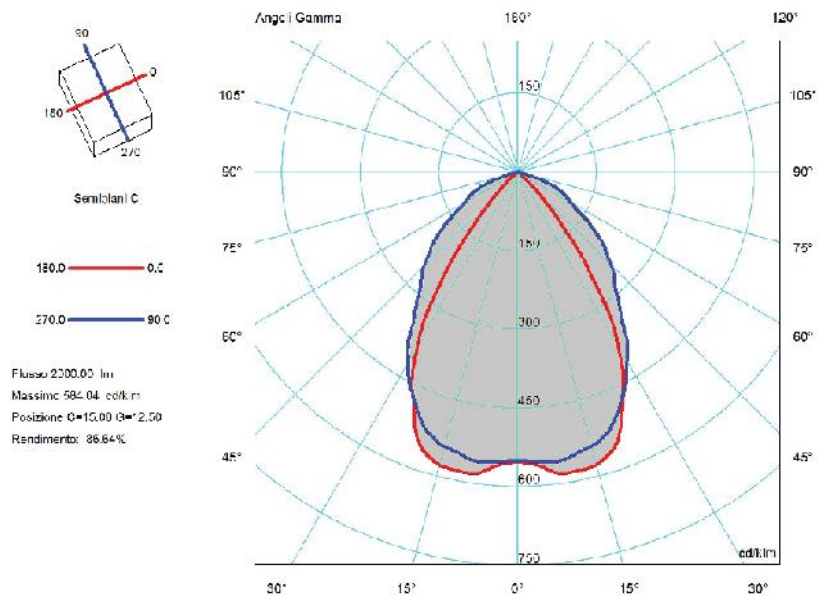
Per quanto riguarda la soluzione a fosfori remoti, sono state effettuate due differenti verifiche:

- E' stato verificato che il valore di irradianza sulla superficie del fosforo remoto, risulti inferiore a valore massimo indicato dal costruttore: questo dovrebbe garantire che sull'elemento stesso non si sviluppino temperature eccessive che possono degradare il componente o ridurre significativamente le prestazioni previste
- E' stata condotta una simulazione termica, in cui i LED bianchi del caso precedente, sono stati sostituiti con i LED blu utilizzati nel progetto (anche in questo caso si è supposto un funzionamento al 100% di tutte le sorgenti LED) : ciascuno di essi è stato modellato come una sorgente di calore a cui è stata assegnata una potenza di 0.53 W con una resistenza termica di 6 °C/W.

Il comportamento del FR è stato simulato attraverso una sorgente di calore superficiale di circa 2.62 W che è stata posta in corrispondenza della superficie interna del policarbonato di chiusura di ciascuna delle due camere di miscelazione. Al termine della simulazione si è verificato che la superficie del fosforo non raggiungesse valori di temperatura superiori a 80°C.

#### 24.10 Progetto | Caratteristiche fotometriche e simulazioni di illuminazione

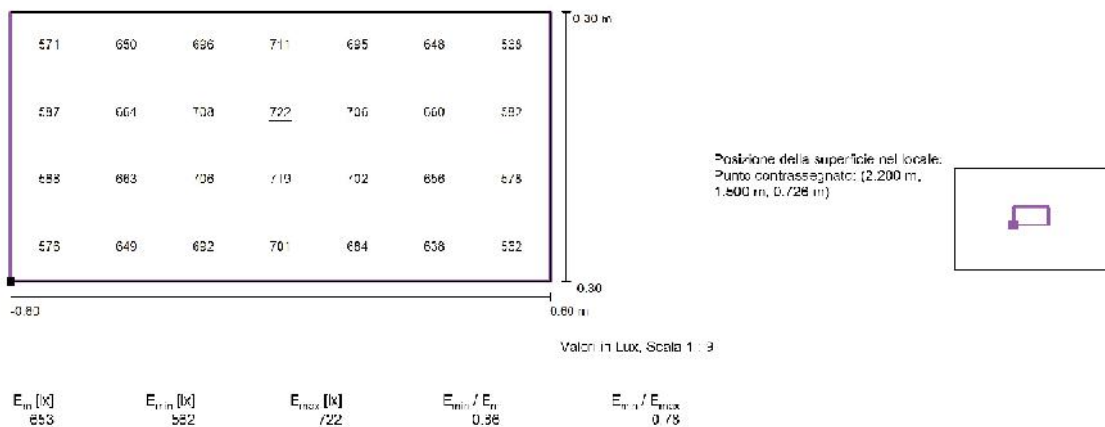
Il solido fotometrico dell'apparecchio, che emette in maniera indiretta con un rendimento  $\eta=87\%$ , è stato ottimizzato al fine di limitare l'abbagliamento e in modo tale da ottenere un'illuminazione ben distribuita sul piano di una scrivania. Le indicatrici di emissione sono riportate alla Figura 177.



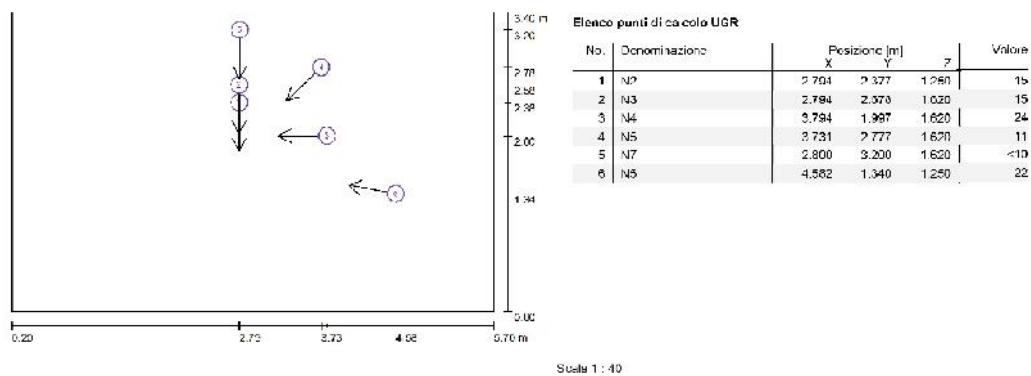
**Figura 177** Indicatrici di emissione dell'apparecchio COELO. In rosso, sul piano C=0-180°, in colore blu sul piano C=90-270°

Al fine di valutare le prestazioni illuminotecniche del sistema progettato in termini dei livelli di illuminamento sulla superficie della scrivania, come grado di uniformità di illuminamento e al fine di valutarne il comfort in termini di abbagliamento (UGR), è stata realizzata una simulazione di installazione dell'apparecchio all'interno di un ufficio mediante l'uso di un software di calcolo illuminotecnico (Dialux).





**Figura 178 Simulazione impiantistica dell'apparecchio sul piano della scrivania. Distribuzione degli illuminamenti e valori di uniformità di illuminamento**



**Figura 179 Posizione degli osservatori UGR nell'ambiente simulato e direzione di osservazione**

Nella Figura 178, sono riportati i risultati illuminotecnici in riferimento ai valori di illuminamento riscontrabili sul piano della scrivania, tenendo conto che l'apparecchio, in questa configurazione, presenta entrambe le camere a fosfori remoti completamente accese.

Diversamente, nell'uso con bianco dinamico, l'apparecchio verrebbe fatto funzionare con un opportuno livello di dimming delle correnti di alimentazione, in modo da ottenere un livello medio mantenuto pari a 500 lux sul piano della scrivania.

Per quanto riguarda il grado di comfort dell'apparecchio (Figura 179), sono stati valutati diversi posizionamenti di un osservatore seduto alla scrivania (Punto di calcolo 1, valore UGR 15) oppure di un osservatore in piedi di fronte all'apparecchio (Punto di calcolo 2, valore UGR 15 e Punto di calcolo 5 con valore di UGR<10). In tutti questi casi il comfort dell'osservatore è garantito dato che i valori dell'indice UGR risultano inferiori a 19.

In altri casi in cui l'utente non è impegnato in un compito visivo impegnativo, come il lavoro alla propria scrivania (posizioni fronte laterale oppure laterale rispetto alla scrivania), il valore UGR risulta compreso tra 22 e 24, in analogia ad altri prodotti di mercato destinati all'illuminazione di uffici.

## 25 Sistema | COEEO<sup>n</sup>

COEEO è declinato in un sistema prodotto di illuminazione per mezzo di elementi componibili: il singolo COEEO può essere utilizzato in coppie (montandone due in maniera contigua o libera) oppure in configurazioni che prevedano l'utilizzo di più moduli (disposti in linea oppure ravvicinati). L'apparecchio di tipo modulare è maggiormente flessibile e in grado di meglio soddisfare diverse esigenze e applicazioni.

Il sistema **MODULARE** e **RICONFIGURABILE** prevede l'utilizzo di un numero di elementi diversi ripetuti (Figura 180) e assemblati in maniera tale da costituire la configurazione desiderata. In particolare, sia il riflettore, sia gli elementi di cover superiore sono stati studiati al fine di poter essere opportunamente montati per soddisfare diverse soluzioni di design.

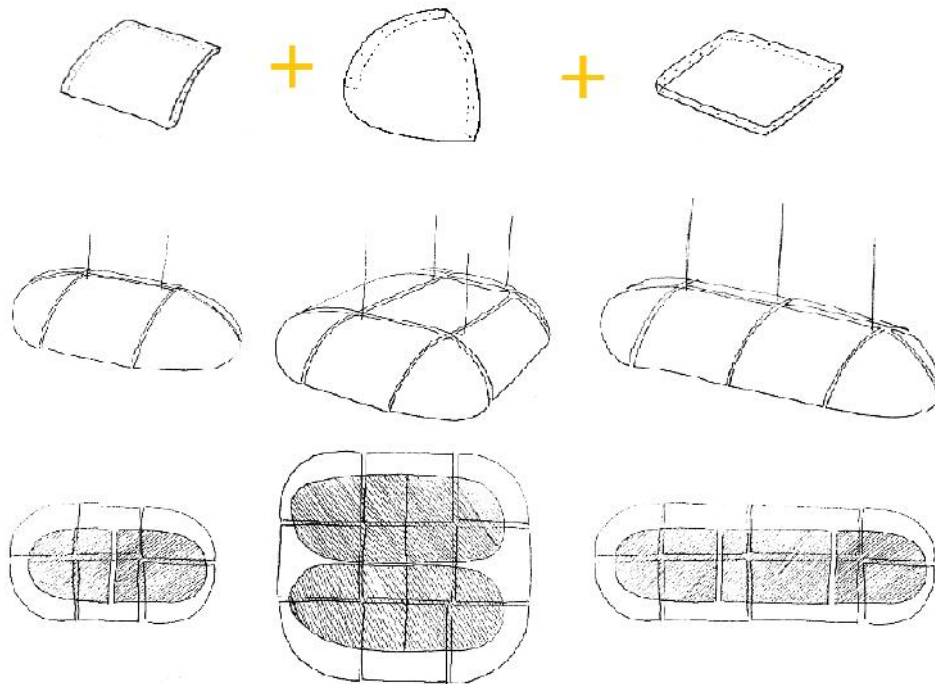
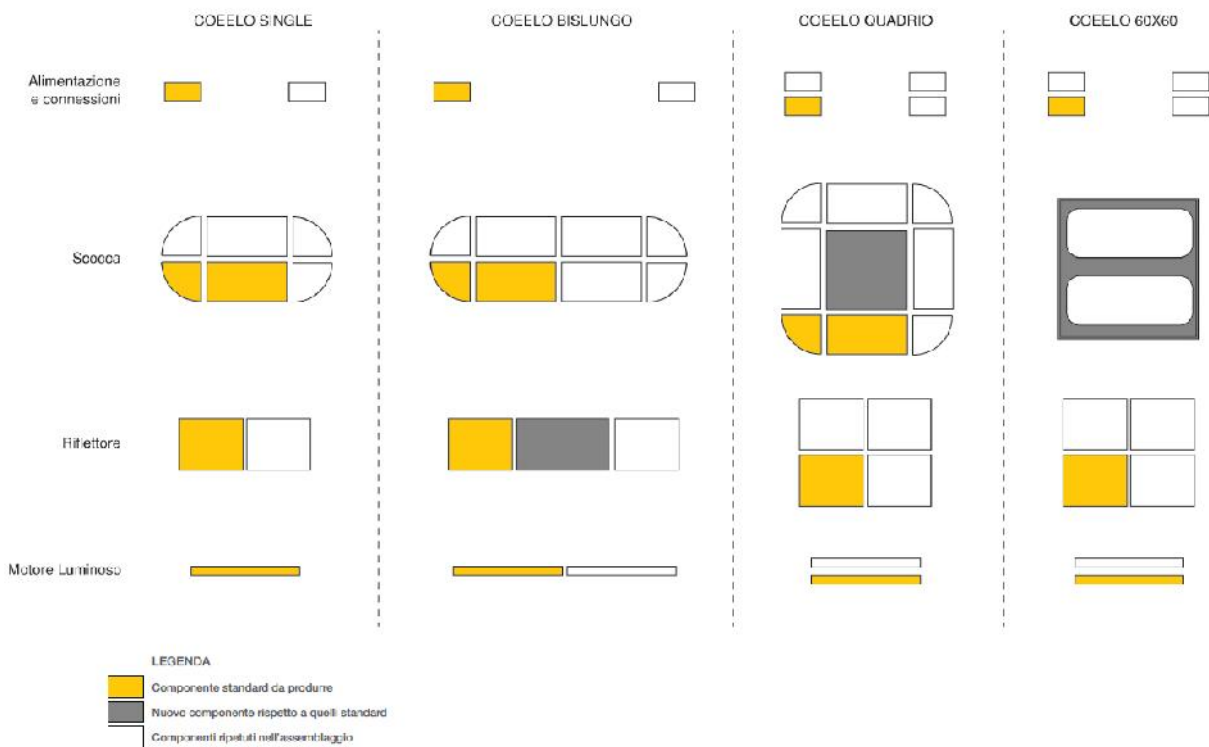


Figura 180 Design modulare e riconfigurabile del sistema COEEO

### 25.1 Progetto | Configurazione

Variabilità e versatilità di utilizzi è l'idea intrinseca del modulo che diventa elemento di luce variabile e configurabile per diverse applicazioni nello spazio ufficio (Figura 181).



**Figura 181** Diverse configurazioni possibili del modulo a formare tre differenti prodotti di illuminazione. Per ciascuna configurazione sono indicate le componenti standard, le nuove e quelle ripetute nel corso dell'assemblaggio

Secondo questo schema (Figura 182), il modulo, data la sua estrema semplicità, può configurarsi in diversi modi, sempre inserendo una coppia di moduli nello spazio lineare, quadrato oppure all'interno del modulo 60 x 60 cm con un semi incasso in un controsoffitto.

Si prefigurano tre tipologie di apparecchi, ma in realtà il sistema così concepito può declinarsi in modelli diversi.



**Figura 182** Rendering delle tre possibili configurazioni ottenibili

1) COEELO BISLUNGO

Il sistema modulare lineare con due moduli contigui si configura in un apparecchio oblungho a sospensione caratterizzato dagli stessi componenti del COEELO singolo ripetuti e assemblati in modo diverso.

Tale configurazione con due motori luminosi, uniti tramite un elemento di giunzione, potrebbe essere ripetuta con tre moduli e così via in base alle esigenze di illuminazione dello spazio.

La forma complessiva ricorda un apparecchio di illuminazione indiretta dalle forme sinuose e morbide in cui, il satellite che permette l'illuminazione, si ricollega formalmente con dimensioni molto ridotte.

Il prodotto Coeelo Bislungo ha un ingombro di massima di 304 x 924 x 160 mm

## 2) COEEO QUADRIO

La configurazione equipaggiata da due motori luminosi può essere eventualmente anche costruita a formare un apparecchio di illuminazione dalla forma squadrata con gli angoli arrotondati.

Tale forma riprende la morbidezza delle curve disegnate e rende l'apparecchio più compatto.

Il prodotto Coeelo Quadrio ha un ingombro di massima di 613,4 x 613,4 x 160 mm

## 3) 60X60 (semi-incasso)

Il sistema modulare è stato progettato per poter essere incassato all'interno del soffitto nei moduli standardizzati 60 x 60 cm, spesso impiegati negli uffici. Per sfruttare dunque al massimo la possibilità offerte dalla modularità si è pensato di ricorrere a un semi-incasso supponendo che lo spazio di incasso medio sia circa pari a 10 cm.

In questa configurazione il riflettore che ha una profondità di circa 6 cm e viene inserito nell'incasso (10 cm) insieme agli ausiliari elettrici: il motore luminoso, diversamente da tutti gli altri elementi, sporge dal filo del soffitto e diventa l'unica presenza visibile dell'apparecchio nello spazio.

Possiamo quindi affermare che la configurazione 60x60 scompare elegantemente a soffitto, integrandosi perfettamente con l'architettura ed è visibile soltanto il riflettore, integrato nel sistema di montaggio a cornice e il modulo contenente le sorgenti luminose.

Il modulo 60x60 diventa dunque un grosso specchio luminoso da cui sporgono due semplici e minimali elementi tridimensionali.

Coeelo nella configurazione modulo 60x60 ha un ingombro massimo di 608 x 608 x 160 mm (con una sporgenza massima verso l'esterno pari a 70 mm).

## 26 Prototipo Coeelo | Lista degli allegati

Alla presente relazione di ricerca e progetto si allegano i disegni bidimensionali e modelli tridimensionali dell'apparecchio singolo COEELO. La lista degli allegati forniti è la seguente:

1) Modelli tridimensionali in formato \*.step

MODELLO\_COMPLETO\_COEELO.STEP

cartella contenente il modello completo (assieme) 3D in formato STEP

MODELLI\_PARTI\_COEELO.STEP

cartella contenente le parti che costituiscono il modello 3D in formato STEP

1\_CONNESSIONE LATERALE.STEP

2 DISSIPATORE.STEP

3\_COVERCONNETTORE\_LATERALE.STEP

4\_MCPCB.STEP

5\_FURUKAWA.STEP

6\_FOSFORO REMOTO.STEP

7\_RIFLETTORI.STEP

8A\_COVER\_PARTE\_LINEARE.STEP

8B\_COVER\_PARTE\_CURVA.STEP

2) Disegni bidimensionali in formato .dwg

MODELLO\_COEELO\_TAVOLE.DWG

cartella contenente le tavole di assieme e delle parti in formato DWG

ASSEMBLING MODELLO COMPLETO.DWG

1\_CONNESSIONE LATERALE.DWG

2 DISSIPATORE.DWG

3\_COVERCONNETTORE\_LATERALE.DWG

4\_MCPCB.DWG

5\_FURUKAWA.DWG

6\_FOSFORO REMOTO.DWG

7\_RIFLETTORI.DWG

8A\_COVER\_PARTE\_LINEARE.DWG

8B\_COVER\_PARTE\_CURVA.DWG

3) Presentazione PDF del progetto COEELO Comfortable Efficient Experiential Lighting for Office



## 27 Conclusioni

Il progetto presentato ha come scopo principale quello di realizzare un apparecchio di illuminazione in cui non solo l'efficienza energetica sia tratto fondamentale ma anche il rapporto con l'individuo, nel comfort abbinato ad un'esperienza personale dello spazio ufficio: l'acronimo che lo identifica "COEELO", significa appunto "**Comfortable, Efficient Experiential Lighting for Office**".

Tutte le scelte progettuali e tecnologiche effettuate sono il risultato della fase di ricerca preliminare sia dal punto di vista della relazione dell'illuminazione tra l'essere umano e l'illuminazione, sia dal punto di vista delle scelte tecnologiche validate dalle misure effettuate in laboratorio.

L'apparecchio da ufficio è stato disegnato a partire da un'idea di modularità, ovvero di un elemento singolo base che possa essere ripetuto e riconfigurato in diverse combinazioni al fine di assolvere diverse funzioni di illuminazione (definite in base alle attività svolte, alle dimensioni della stanza e alle caratteristiche fisiche di montaggio in cui il prodotto possa essere configurato).

Partendo dalla scomposizione e ricomposizione funzionale di un apparecchio di illuminazione classico da ufficio (design by components) e prendendo in considerazione come elementi chiave la massima efficienza parallelamente al massimo comfort, si è concepito un prodotto di illuminazione caratterizzato da diversi blocchi logici funzionali:

- Motore luminoso con riflettore esterno (per un'illuminazione indiretta ad alta efficienza),
- Scocca di assemblaggio esterna (configurabile)
- Alimentazione e connessioni (montaggio a sospensione o semi-incasso inserito in un modulo 60 x 60)

Il motore luminoso è stato pensato per poter essere equipaggiato con tecnologie diverse, a fosfori remoti oppure con white power LED in maniera da garantire diverse soluzioni più efficienti o più confortevoli oppure di permettere il continuo ricambio tecnologico data la costante evoluzione dei LED. Tale scelta permette di prolungare la vita dell'apparecchio senza modificarne il design.

Il modulo singolo COEELO può essere utilizzato in coppie (montandone due in maniera contigua o libera) oppure in configurazioni che prevedano l'utilizzo di più moduli (disposti in linea oppure ravvicinati). Questa caratteristica del progetto nasce dalla convinzione che l'apparecchio di tipo modulare sia maggiormente flessibile e in grado di meglio soddisfare diverse esigenze e applicazioni.

Il sistema **MODULARE** e **RICONFIGURABILE** presentato nella relazione prevede l'utilizzo di un numero di elementi diversi ripetuti e assemblati in maniera tale da costituire la configurazione desiderata. In particolare, sia il riflettore, sia gli elementi di cover superiore sono stati studiati al fine di poter essere opportunamente montati per soddisfare diverse soluzioni di design (Figura 183).



**Figura 183 Il sistema COEELO è riconfigurabile e modulare**

Il motore luminoso, per le sue caratteristiche di progetto, può essere utilizzato per mettere a confronto le diverse tecnologie di generazione di bianco dinamico a parità di condizioni al contorno consentendo di

ricavare informazioni dettagliate sia in termini di efficienza luminosa, sia in relazione alla qualità cromatica della luce prodotta (variazione della cromaticità in funzione dell'angolo di emissione, resa cromatica).

## 28 Riferimenti bibliografici

1. Nouvel, J.(2013) Progetto: ufficio da abitare, progetto presentato ad Aprile 2013 presso 52ma edizione del Salone Internazionale del Mobile, Milano
2. Augè M. (1993) Non luoghi. Introduzione a un'antropologia della surmodernità, Milano, Eleuthera
3. Nouvel, J.(2013) Progetto: ufficio da abitare, 4 designer in ufficio progetto presentato ad Aprile 2013 presso 52ma edizione del Salone Internazionale del Mobile, Milano
4. Norma UNI EN 12464 -1 (2011) "Illuminazione dei luoghi di lavoro"
5. Rossi, M. (2008). Design della luce - Fondamenti ed esperienze nel progetto della luce per gli esseri umani, Maggioli Editore, Rimini
6. Boyce, P.R. (2004). Lighting research for interiors: the beginning of the end or the end of the beginning. *Lighting Research and Technology*, Vol. 36 No. 4:283-293
7. Veitch, JA, Julian W, Slater AI (1998). A framework for understanding and promoting lighting quality, CIE x015-1998 Proceedings of the First CIE Symposium on Lighting Quality, Veitch JA, Ed, 237-241.
8. Boyce, P.R., Veitch, J.A., Newsham, G.R., Myer, M., Hunter, H.,(2003) Lighting Quality and Office Work: a field simulation study, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington
9. Lok, C.: Vision science: Seeing without seeing. *Nature* 469(7330), 284–285 (2011)
10. Berson, D.M., Dunn, F.A., Takao, M.: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* 295(5557), 1070–1073 (2002)
11. Lockley, S.W.: Circadian Rhythms and other brain functions. In: 2nd CIE Expert Symposium on Lighting and Health, p. 22–26 (2006)
12. Brainard, G.C., et al.: Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J. Neurosci.* 21(16), 6405–6412 (2001)
13. Brainard, G.C., Provencio, I.: Photoreception for the neurobehavioral effects of light in humans. In:2nd CIE Expert Symposium on Lighting and Health, pp. 6–21 (2006)
14. Thapan, K., Arendt, J., Skene, D.J.: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J. Physiol.* 535(Pt 1), 261–267 (2001)
15. Lockley, S.W., et al.: Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. *Sleep* 29(2), 161–168 (2006)
16. Geerdinck, L.M., Schlangen, L.J.: Well-Being Effects of high color temperature lighting in office and industry. In: 2nd CIE Expert Symposium on Lighting and Health, pp. 126–130 (2006)
17. Rea, M.S., Figueiro, M.G., Bullough, J.D.: Circadian photobiology: an emerging framework for lighting practice and research. *Lighting Research Technology* 34, 177–190 (2002)
18. Rea, M.S., et al.: Implications for white light sources of different colour temperatures. In: 2nd CIE Expert Symposium on Lighting and Health (2006)
19. Fostervold, K.I., Nersveen, J.: Proportions of direct and indirect indoor lighting - The effect on health, well-being and cognitive performance of office workers. *Lighting Research Technology* 40, 175–200 (2008)
20. Figueiro, M. G.; Bullough, J. D.; Parsons, R. H.; Rea, M.S.: Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans, *Neuroreport* 5, pp. 313-316, 2004
21. Figueiro, M. G.; Bullough, J. D.; Parsons, R. H.; Rea, M.S.: Preliminary evidence for a change in spectral sensitivity of the circadian system at night, *Journal of circadian Rhythms* 2005, 3:14
22. Rea, M. S.; Bullough, J. D.; Figueiro, M. G.; Bierman, A.: Spectral Opponency in Human Circadian Phototransduction: Implications for Lighting Practice, Proc. Symp. 2004, "Light & Health" CIE x027: 2004, pp. 111-115, 2004
23. Brainard, G. C.; Hanifin, J. P.: The Effects of Light on Human Health and Behavior: Relevance to Architectural Lighting, Proc. Symp. 2004 „Light & Health“ CIE x027: 2004, pp. 2-16, 2004

24. Rea, M. S.; Bullough, J. D.; Bierman, A.; Figueiro, M. G.: Implications for White Light Sources of Different Correlated Color Temperatures. CIE Proc. Symp. „Lighting & Health“ Ottawa CIE x032: 2006, pp. 33-38
25. Glickman, G.; Hanifin, J. P.; Rollag, M. D.; Wang, J.; Cooper, H.; Brainard, G. C.: Inferior Retinal Light Exposure Is More Effective than Superior Retinal Exposure in Suppressing Melatonin in Humans, *Journal of Biological Rhythms*, Vol. 18 No. 1, pp 71-79, 2003
26. Lasko T.A., Kripke D.F., Elliot J.A. (1999): Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields. *J. Biol. Rhythms* Vol. 14 Nr. 2 S. 122-125
27. Visser EK, Beersma DG, Daan S. Melatonin suppression by light in humans is maximal when the nasal part of the retina is illuminated. *Journal of Biological Rhythms* 1999; 14(2): 116–121.
28. R ger, M., Gordijn, M.C.M., Beersma, D.G.M., de Vries, B., Daan, S. (2006): Time-of-day- dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology: comparison of daytime and nighttime exposure. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* Vol.290 S. R1413-20
29. Lang, D., Fassian, M.: Planungsempfehlungen f r biologisch effiziente Beleuchtung. *Licht und Lebensqualit t* (2007)
30. Smith, K. A.; Schoen, M. W.; Czeisler, C. A.: Adaptation of Human Pineal Melatonin Suppression by Recent Photic History, *J Clin Endocrinol Metab*, July 2004, 89(7):3610–3614
31. Gronfier, C., Wright, K.P., Kronauer, R. E., Jewett, M.E., Czeisler, C.A. (2004): Efficacy of a single sequence of intermittent bright light pulses for delaying circadian phase in humans. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, Vol. 287 Nr. 1 S. E174-E181
32. Rimmer, D.W., Boivin, D.B., Shanahan, T.L., Kronauer, R.E., Duffy, J.F., Czeisler, C.A. (2000): Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light. *American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, Vol. 279 Nr. 5 S. R1574-R1579
33. Kronauer; R.E., Forger, D.B., Jewett, M.E. (1999): Quantifying Human Circadian Pacemaker Response to Brief, Extended, and Repeated Light Stimuli over the Photopic Range. *Journal of Biological Rhythms*, Vol. 14 No. 6, S. 501-515
34. Moser, M., et al.: Cancer and rhythm. *Cancer Causes Control* 17(4), 483–487 (2006)
35. Stevens RG, Blask DE, Brainard GC, et al. Meeting report: The role of environmental lighting and circadian disruption in cancer and other diseases. *Environ Health Perspect.* 2007 Sep; 115(9): 1357-62.
36. World Health Organization, International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs Programme finds cancer hazards associated with shiftwork, painting and firefighting. Press Release #180: 2007.
37. Megdal, S.P., Kroenke, C.H., Laden, F., Pukkala, E., Schernhammer, E.S. (2005): Night work and breast cancer risk: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Cancer*, Vol. 41 Nr. 13 S. 2023-2032.
38. Pauley, S.M. (2004): Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical Hypotheses*, Vol. 63 Nr. 4 S.588-596.
39. Stevens, R.G. (2006): Artificial lighting in the industrialized world: Circadian disruption and breast cancer. *Cancer Causes & Control*, Vol. 17 Nr. 4 S. 501-507.
40. Van Bommel, W.: Dynamic Lighting at work - Both in level and colour. In: 2nd CIE Expert Symposium on Lighting and Health (2006)
41. Veitch, J., et al.: Lighting appraisal, wellbeing and performance in open-plan offices: A linked mechanism approach. *Lighting Research Technology* 40, 133–151 (2008)
42. Takahashi, M., Fukuda, H., Arito, H.: “Brief naps during post-lunch rest: effects on alertness, performance and autonomic balance”. *European Journal of Applied Physiology and occupational Physiology*, 1998, 78(2): 93-98.
43. Tietzel, A.J., Lack, L.C.: “The recuperative value of brief and ultra-brief naps on alertness and cognitive performance”. *Journal of Sleep Research*, 2002, 11(3): 213-218.
44. Hayashi, M., Motoyoshi, N., Hori, T.: “Recuperative power of a short daytime nap with or without stage 2 sleep”. *Sleep*, 2005, 28 (7): 829-836.

45. MS Rea, MG Figueiro, A Bierman and R Hamner, "Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system", *Lighting Res. Technol.* 2012; 44: 386–396
46. Veitch, JA, Julian W, Slater AI (1998). A framework for understanding and promoting lighting quality, *CIE x015-1998 Proceedings of the First CIE Symposium on Lighting Quality*, Veitch JA, Ed, 237-241.
47. Boyce PR (2004). Lighting research for interiors: the beginning of the end or the end of the beginning. *Lighting Research and Technology*, 36, 283-294.
48. CIE Publication 29.2: "Guide on interior lighting" (1986)
49. Boyce PR et al. (2006). Lighting quality and office work: Two field simulation experiments. *Lighting Research and Technology*, 38(3), 191-223.
50. Veitch JA, Newsham GR (2000). Preferred luminous conditions in open plan offices: Research and practice recommendations. *Lighting Research and Technology*, 32, 199-212.
51. Houser KW et al. (2002). The subjective response to linear fluorescent direct/indirect lighting systems. *Lighting Research and Technology*, 34(3), 243-264.
52. Boyce PR et al. (2006). Occupant use of switching and dimming controls in offices. *Lighting Research and Technology*, 38(4), 358-378.
53. Veitch JA, Newsham GR (2000). Exercised control, lighting choices, and energy use: An office simulation experiment. *Journal of Environmental Psychology*, 20, 219-237.
54. Veitch, JA et al. (2008). Lighting appraisal, well-being, and performance in open-plan offices: A linked mechanisms approach. *Lighting Research and Technology*, 40(2), 133-151
55. Veitch J., Newsham G., Jones C., Arsenault C., Mancini S., "High quality lighting: Energy Efficiency that enhances employee well-being", *Proceeding of CIE 2010, "Lighting Quality and Energy Efficiency"*
56. Yamakawa K, Watabe K, Inanuma M, Sakata K, Takeda H. A study on the practical use of a task and ambient lighting system in an office. *Journal of Light and Visual Environment* 2000; 24: 15–18.
57. McKennan G, Parry C. An investigation of task lighting for offices. *Lighting Research and Technology* 1984; 16: 171-186.
58. Yamakawa K, Watabe K, Inanuma M, Sakata K, Takeda H. A study on the practical use of a task and ambient lighting system in an office. *Journal of Light and Visual Environment* 2000; 24: 15–18.
59. Bean A, Hopkins A. Task and background lighting. *Lighting Research and Technology* 1980; 12: 135–139
60. Tabuchi Y, Matsushima K, Nakamura H. Preferred illuminances on surrounding surfaces in relation to task illuminance in office room using task-ambient lighting. *Journal of Light and Visual Environment* 1995; 19: 28–39.
61. Design of LED-based reflector-array module for specific illuminance distribution *Optics Communications*, Vol. 289 (February 2013), pp. 19-27, doi:10.1016/j.optcom.2012.09.082 by Enguo Chen, Feihong Yu
62. Dot-pattern design of a light guide in an edge-lit backlight using a regional partition approach *Optical Engineering*, Vol. 46, No. 4. (2007), pp. 043002-1-043002-9, doi:10.1117/1.2721423 by Jee-Gong Chang, Yu-Bin Fang
63. Viénot F., Mahler E., Serreault L., Harrar M., Ezrati J-J., Pérignon P., Bricoune A., "Discriminating colours under LED illumination", *Proceedings of 10th Congress of the International Colour Association, Granada (Granada, 2005)*, pp. 33-36.
64. S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, *Appl. Phys. Lett.* 64,1687 (1994).
65. Ching-Ching Yang, Chun-Li Chang, Kuo-Cheng Huang, Tai-Shan Liao, "The Yellow Ring Measurement for the Phosphor-converted White LED", *Physics Procedia*, Volume 19, 2011, Pages 182-187, ISSN 1875-3892, 10.1016/j.phpro.2011.06.146.
66. Jong Kyu Kim, Hong Luo, Eric Fred Schubert, Jaehee Cho, Cheolsoo Sone and Yongjo Park, "Strongly Enhanced Phosphor Efficiency in GaInN White Light-Emitting Diodes Using Remote Phosphor Configuration and Diffuse Reflector Cup", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 44, No. 21, 2005, pp. L 649–L 651

67. N. Narendran, Y. Gu, J. P. Freyssinier-Nova, and Y. Zhu, "Extracting phosphor-scattered photons to improve white LED efficiency", *phys. stat. sol. (a)* 202, No. 6, R60–R62 (2005) / DOI 10.1002/pssa.200510015
68. Yoshi Ohno, "Color Rendering and Luminous Efficacy of White LED Spectra", Fourth International Conference on Solid State Lighting, edited by Ian T. Ferguson, Nadarajah Narendran, Steven P. DenBaars, John C. Carrano, *Proc. of SPIE Vol. 5530* (SPIE, Bellingham, WA, 2004) • 0277-786X/04/\$15 • doi: 10.1117/12.565757
69. Keppens, A., Zong, Y, Ohno, Y, Deconinck, G., Hanselaer, P, " DETERMINING PHOSPHORS' EFFECTIVE QUANTUM EFFICIENCY FOR REMOTE PHOSPHOR TYPE LED MODULES", CIE Tutorial and Expert Symposium on Spectral and Imaging Methods for Photometry and Radiometry location: Bern date: 30 July - 2 August 2010
70. A. Keppens, P. Hanselaer, Y. Zong, Y. Ohno, " Characterization of remote phosphor type of LEDs", CORM 2010
71. Keppens, A., Zong, Y, Ohno, Y, Deconinck, G., Hanselaer, P, " DETERMINING PHOSPHORS' EFFECTIVE QUANTUM EFFICIENCY FOR REMOTE PHOSPHOR TYPE LED MODULES", CIE Tutorial and Expert Symposium on Spectral and Imaging Methods for Photometry and Radiometry location: Bern date: 30 July - 2 August 2010
72. Chung-Hao Tien ; Chien-Hsiang Hung ; Bo-Wen Xiao ; Hsin-Tao Huang ; Yi-Pai Huang, et al. "Planar lighting by blue LEDs array with remote phosphor", *Proc. SPIE 7617, Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XIV*, 761707 (February 11, 2010); doi:10.1117/12.841218;
73. Hsin-Tao Huang; Yi-Pai Huang; Chuang-Chuang Tsai, "Planar Lighting System Using Array of Blue LEDs to Excite Yellow Remote Phosphor Film," *Display Technology, Journal of*, vol.7, no.1, pp.44,51, Jan. 2011
74. Hsin-Tao Huang; Yi-Pai Huang; Chuang-Chuang Tsai, "Planar Lighting System Using Array of Blue LEDs to Excite Yellow Remote Phosphor Film," *Display Technology, Journal of*, vol.7, no.1, pp.44,51, Jan. 2011

## 29 Abbreviazioni ed acronimi

- YB : Yellow-blue ratio of a phosphor-white spectrum  
LLE : LED Light Engine  
COB : Chip on Board  
FR : Fosforo Remoto  
LER : Luminous Efficacy of optical Radiation (lm/W)

## 30 Appendice – Curriculum gruppo di Lavoro

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>