



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Advance LED lighting design nell'illuminazione pubblica:

Relazione tecnica attività C.2

Ricerca progettuale PLUS ME

M. Rossi, D. Casciani, F. Musante



ADVANCE LED LIGHTING DESIGN NELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA:
RELAZIONE TECNICA ATTIVITA' C.2
RICERCA PROGETTUALE PLUS SENSE

Responsabile della ricerca per il Politecnico di Milano: prof. Maurizio Rossi

M. Rossi, D. Casciani, F. Musante (Politecnico di Milano, Dipartimento INDACO)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

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

Progetto: Innovazione nella illuminazione pubblica, nuove tecnologie ed integrazione smart con altre reti di servizi energetici

Responsabile del Progetto: Simonetta Fumagalli, ENEA

Indice

Sommario	5
Introduzione	6
Stato dell'arte e considerazioni preliminari	7
<i>Sorgenti</i>	7
<i>Desiderata</i>	8
<i>COB e ottiche riflettenti</i>	11
<i>Esame soluzioni ottiche possibili</i>	14
Nactus di Khatod	14
TLED SL-CX02.....	16
TLED SL-CM01	17
FRAEN F2L3-1-RE.....	18
Edison EMPW-C60MXRG-12X	21
Soluzione power led+ ottiche	22
OSRAM STREETlight Advanced - SLA1.....	27
LEDIL STRADA DW e DN	29
LEDLINK	31
<i>Geometria di impianto</i>	33
<i>Performance di riferimento</i>	34
<i>Vincoli di progetto</i>	35
Progettazione preliminare modulo PLUS ME	38
<i>Progetto Ottica con Power LED</i>	38
<i>Progetto ottico del sistema</i>	41
<i>Ombreggiatura delle lenti</i>	46
<i>Sistema Ottico (studio preliminare)</i>	48
<i>Modello termico del LED</i>	51
<i>Volume di controllo</i>	54
<i>Modellazione del PCB</i>	55
<i>Dissipazione termica (studio preliminare)</i>	58
<i>Sistema di alimentazione (studio preliminare)</i>	60
<i>Concept di design</i>	61
Progettazione modulo PLUS ME	67
<i>Studio ottico e termico del modulo definitivo</i>	67
<i>Interfaccia Termica</i>	70
<i>Simulazioni termiche per la definizione del modulo</i>	72
<i>Simulazione termica modulo selezionato</i>	74
<i>Fotometria modulo selezionato</i>	75
<i>Decadimento del flusso luminoso</i>	76

<i>Schermo di chiusura per il modulo selezionato</i>	77
<i>Design dell'apparecchio</i>	78
Conclusioni	80
Lista degli allegati	82

Sommario

Lo scopo generale della ricerca è quello di progettare un sistema ottico a LED adatto ad illuminare una strada a traffico motorizzato che rispetti i requisiti delle categoria illuminotecnica MExx (in riferimento alla normativa UNI EN 13201-2: 2004) per applicazioni in strade urbane di tipo F. I principali obiettivi riguardano la realizzazione di un apparecchio modulare con un basso numero di sorgenti luminose (rispetto ad altri prodotti già presenti sul mercato) che consenta di ridurre gli ingombri e creare la condizioni per un design di un prodotto originale e innovativo. In particolare dunque si terrà particolarmente conto dell'efficienza energetica del sistema, della riduzione di dimensioni e materiali del corpo illuminante e della modularità del sistema per un'applicabilità scalare dell'apparecchio in diverse situazioni impiantistiche.

La fase iniziale della ricerca si è focalizzata su uno studio dello stato dell'arte utile ad esaminare alcune delle soluzioni ottiche disponibili sul mercato al fine di trarne alcune considerazioni tecniche per il successivo sviluppo del prodotto. Oltre a ciò è stata fatta una selezione e un'analisi comparativa tra le prestazioni delle sorgenti LED e dei componenti ottici ad oggi effettivamente disponibili sul mercato tali da poter essere applicati nel modulo PLUS ME. Da questa analisi preliminare è stato sviluppato un progetto di massima che indica le performance desiderate e i vincoli del prodotto di illuminazione utilizzati nella fase di progettazione del modulo vera e propria.

In particolare, lo stadio di progettazione del modulo PLUS ME prevede una focalizzazione su tre elementi che vengono sviluppati in parallelo: l'apparato ottico, l'apparato termico e la funzionalità meccanica del prodotto. La fase di progetto del sistema ottico di un apparecchio SSL inizia con la modellazione della sorgente LED o del sistema LED con lenti per ottenere una serie di simulazioni fotometriche che tengano in considerazione della fotometria delle lenti secondarie e delle eventuali ombreggiature tra le stesse, la coppa di protezione e eventuali schermature del supporto meccanico del modulo. La fase di progetto relativa alla dissipazione si basa su una simulazione termica di una serie di dispositivi che variano in base alla geometria ("forma" del modulo) e alla tipologia di alettatura per ottenere una temperatura di giunzione prossima al valore di 70°C. Infine la fase di progettazione meccanica del modulo si è focalizzata sul massimizzare le funzioni ottiche e termiche e allo stesso tempo mantenere le minime dimensioni, i minimi ingombri e utilizzare al minimo i materiali in una forma modulare.

Il progetto del PLUS ME finale consiste in un modulo dotato di 8 LED accoppiati a lenti secondarie con distribuzione asimmetrica del flusso luminoso, e da un sistema di dissipazione integrato e una coppa di protezione (garantisce il desiderato valore di protezione del vano ottico rispetto all'ingresso di polvere e acqua). Tali moduli sono combinati in maniera tale da ottenere apparecchi di illuminazione di diversa taglia: 4 moduli per le classi ME3a, 3 moduli per le classi ME4A, 2 moduli per le classi ME5. In questo senso, l'apparecchio di illuminazione completo PLUS ME non è pensato come un unico elemento monoblocco ma, diversamente, è caratterizzato da tre blocchi logici funzionali: ausiliari elettrici (alimentazioni e sistemi di diagnostica, controllo e comunicazione intelligente, se presenti, integrati nel sistema di fissaggio al palo), attacco al palo e ai moduli e motori luminosi in quantità diverse in base all'applicazione impiantistica.

Introduzione

Lo scopo della ricerca è quello di progettare un sistema ottico adatto ad illuminare una strada a traffico motorizzato (categoria illuminotecnica MExx).

La principale applicazione del prodotto sarà all'interno dell'illuminazione urbana e questo porta ad escludere le strade classificate come A₁ (autostrade extra-urbane) ed A₂ (Strade di servizio alle autostrade e strade di servizio alle autostrade urbane), le strade di tipo B,C,D,E¹(Figura 1).

Tipo di strada	Descrizione del tipo della strada	Limiti di velocità [km h ⁻¹]
A ₁	Autostrade extraurbane	130 - 150
	Autostrade urbane	130
A ₂	Strade di servizio alle autostrade	70 - 90
	Strade di servizio alle autostrade urbane	50
B	Strade extraurbane principali	110
	Strade di servizio alle strade extraurbane principali	70 - 90
	Strade extraurbane secondarie (tipi C1 e C2 ¹)	70 - 90
C	Strade extraurbane secondarie	50
	Strade extraurbane secondarie con limiti particolari	70 - 90
D	Strade urbane di scorrimento veloce	70
		50
E	Strade urbane interquartiere	50
	Strade urbane di quartiere	50

Figura 1 Classificazione delle strade non considerate per lo sviluppo del progetto

Il nostro interesse sarà focalizzato su un prodotto capace di rispondere alle esigenze delle strade classificate come F, che rappresentano il caso più frequente nell'illuminazione urbana: in particolare alle classi F₁ ed F₂(Figura 2).

F	Strade locali extraurbane (tipi F1 e F2 ¹)	70 - 90	ME3a	6.3
	Strade locali extraurbane	50	ME4b	
		30	S3	
	Strade locali urbane (tipi F1 e F2 ¹)	50	ME4b	
	Strade locali urbane: centri storici, isole ambientali, zone 30	30	CE4	
	Strade locali urbane: altre situazioni	30	CE5/S3	
	Strade locali urbane: aree pedonali	5		
	Strade locali urbane: centri storici (utenti principali: pedoni, ammessi gli altri utenti)	5	CE5/S3	
	Strade locali interzonali	50		
30				

Figura 2 Corrispondenza tra categorie illuminotecniche e classificazione della strada. Estratto dalla norma UNI 11248:2007- Prospetto 1

Risulta quindi che la categoria illuminotecnica più performante a cui dovrà rispondere il progetto sarà la classe ME3a, mentre i requisiti meno rigorosi saranno quelli previsti dalla categoria ME6.

¹ Le strade classificate come D ed E sono urbane ma di scarso interesse per la ricerca: in questi casi l'impiego di un sistema di illuminazione con sorgenti tradizionali risulta ancora preferibile.

Stato dell'arte e considerazioni preliminari

Sorgenti

Le sorgenti che verranno considerate nel progetto sono LEDs appartenenti a due tipologie:

- Power LED con efficienze luminose non inferiori a 120-130 lm/W per temperature di giunzione $T_j=25^\circ\text{C}$ e temperatura di colore tra 4000-4700 K e indice di resa cromatica pari a 70
- COB con potenza specifica da 30-50 W e flussi nell'intorno di 100 lm/W per temperature di giunzione $T_j=25^\circ\text{C}$ e temperatura di colore tra 4000-4700 K

La scelta di questa particolare tonalità della luce è compromesso tra le necessità impiantistiche e le performance dei LEDs attualmente sul mercato, senza ricorrere a selezioni di flusso estreme particolarmente costose e difficilmente approvvigionabili.

Per quanto riguarda i COB, la loro naturale applicazione riguarda il prodotto di interni, dove la prestazione in termini di efficienza, può e deve essere sacrificata a favore di una migliore qualità della luce, in termini di resa cromatica. Sono quindi presenti sul mercato molti prodotti con CRI maggiore di 80, che risultano poco adatti in applicazioni dove un valore di 65-70, risulta più che adeguato a soddisfare le esigenze di progetto. Occorre infatti considerare che il prodotto dovrà confrontarsi con le performance di apparecchi con sorgenti tradizionali a luce bianca equipaggiate con alimentatori elettronici, come ad esempio le lampade a ioduri metallici cosmo-polis prodotte da Philips (raggiungono una efficienza di 118 lm/W^2 offrendo però una temperatura di colore di 2800K).

Ordering, Electrical and Technical Data (Subject to change without notice)

Product Number	Ordering Code	Lamp Base	Lamp Wattage	Color Temp.	CRI	Approx. Initial Lumens ⁶	Approx. Mean Lumens ⁷	Rated Average Life ⁸	HQL (In)	LCL (In)
15731-3	CPO-TW 60W/728	PGZ12	60W	2800K	70	4900	6200	30,000	5.20"	2.32"
40604-1	CPO-TW 90W/728	PGZ12	90W	2800K	70	10,450	8800	30,000	5.67"	2.60"
15732-1	CPO-TW 140W/728	PGZ12	140W	2800K	70	16,500	14,020	30,000	5.79"	2.60"

6) Measured at 100 hours of life in a horizontal operating position.

7) Approximate mean lumen output at 40% of lamp rated average life. Measured in vertical and horizontal operating positions.

8) Rated average life is the life obtained, on the average, from large representative groups of lamps in laboratory tests under controlled conditions at 10 or more operating hours per start. It is based on survival of at least 50% of the lamps and allows for individual lamps or groups of lamps to vary considerably from the average. 30,000 hours rated average life at horizontal application. For vertical application, rated average life for 90W and 140W is 28,000 hours, while rated average life for 60W is 15,000 hours.

- High efficacy—up to 118 lumens per watt.

- CosmoWhite™ lamps are "universal lighting", which means that they can be operated in both horizontal and vertical applications. However, the light-technical properties are slightly different in vertical burning position compared to the horizontal position. When rotating the lamp from the horizontal towards the vertical position, the color temperature, CRI, luminous efficacy and lamp lifetime drop compared to the horizontal data.

- UV block similar to MasterColor® lamps.

- Ignition time 30 seconds, re-strike time is 15 minutes.

I Power LEDs che verranno considerati nel progetto sono:

- CREE XM-L
- CREE XP-G
- LUMILEDS REBEL ES
- LUMILEDS LUXEON M

La scelta è motivata dalla disponibilità di lenti free-form per questi modelli e per il rispetto dei vincoli prestazionali evidenziati all'inizio del paragrafo.

Per quanto riguarda invece i COB, i modelli che potranno essere considerati nel progetto sono i seguenti:

- SHARP
- CITIZEN
- BRIDGELUX

Supponendo ad esempio di impiegare 4 COB da 3000 lm ciascuno, con le caratteristiche minime in termini di efficienza e di "qualità" della luce indicate all'inizio del paragrafo, si ottiene la seguente selezione di prodotti per CITIZEN.

² Riferito ai dati della lampada da 140 W, senza considerare le perdite del sistema di alimentazione

CCT-CRI	4000 K – 80 min.	Flusso :3000 lm	T _c (°C)	70
---------	------------------	-----------------	---------------------	----

Product code	I _f (mA)	V _f (V)	P _d (W)	lm/W	T _j (C)
CLL030-1212A1-403M1-A2	963	36.7	35.4	85	98
CLL040-1218A1-403M1-A2	861	34.1	29.4	102	88
CLL040-1818A1-403M1-A2	585	49.0	28.7	105	81
CLL050-1825A1-403M1-A2	584	47.7	27.9	108	78

Figura 3 Led array CITIZEN candidati per l'applicazione

Come si osserva dai dati della Figura 3, l'efficienza luminosa migliore raggiunge i 108 lm/W, per un valore della temperatura di giunzione di 78°C e una potenza di circa 28 W.

Il LED assunto come punto di partenza per la progettazione del riflettore è il CITIZEN CLL030-1212A1-50KL1A1, con le seguenti caratteristiche:

- Flusso luminoso 3235 @ 720 mA
- CCT 5000K
- CRI: Ra 65 tipico
- Resistenza termica 0.8 C/W

Le dimensioni geometriche del componente sono riportate alla Figura 4, dove si osserva che la superficie di emissione è rappresentata da un cerchio di diametro 14 mm circa.

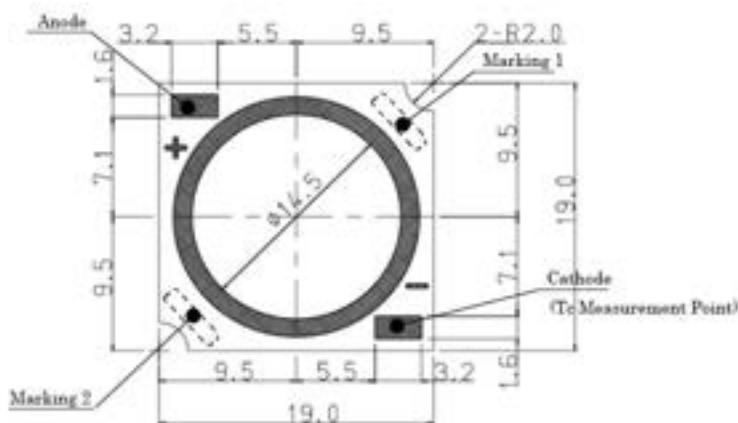


Figura 4 Dimensioni LED CITIZEN CLL030-1212A1-50KL1A1

Desiderata

Vengono elencati nel seguito una serie di caratteristiche che dovranno essere prese in considerazione per lo sviluppo del prodotto; alcune di queste richieste sono conflittuali e di conseguenza l'attività di design del prodotto dovrà cercare il miglior punto di compromesso, tenuto conto anche delle indicazioni provenienti dalla committenza (ENEA).

Modularità : il concetto di modularità dovrà essere trasformato rispetto a quanto previsto nel corso del progetto PLUS precedente: in base alla soluzione ottica selezionata, la soluzione modulare dovrà essere valutata dal punto di vista ottico e meccanico/produttivo.

Esempi di possibili soluzioni:

Apparecchio Power LED e ottiche free-form

In un apparecchio composto da Power LED e ottiche free form (Figura 5), il concetto di modularità potrebbe essere declinato come una pacchetto composto da un PCB e da una combinazione di lenti (per esempio con due differenti emissioni fotometriche, come nella precedente realizzazione) che viene replicato nell'apparecchio in funzione della categoria illuminotecnica desiderata. In questo caso si potrà avere un solo sistema di dissipazione e un solo alimentatore (mettendo i PCB in serie tra di loro), oppure un sistema più flessibile in cui ad ogni modulo è incorporato il driver che sarà alimentato da una tensione continua costante di 24-48 V. In alternativa, verrà utilizzato un solo LED driver posto al di fuori dell'elemento modulare.

Apparecchio Power LED e ottiche riflettenti

Anche una soluzione basata su Power LED e ottiche riflettenti, consente la realizzazione di moduli, la cui combinazione porta alla creazione della fotometria più adatta per una prefissata categoria illuminotecnica.

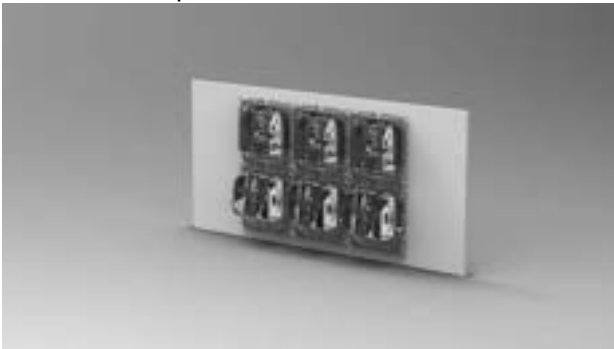


Figura 5 Esempio di modulo basato su Power LED e lenti free-form. Si tratta di una immagine puramente illustrativa

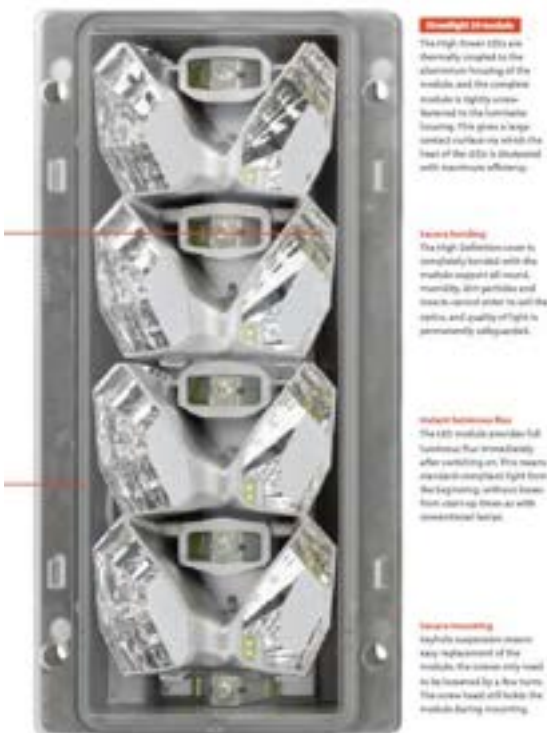


Figura 6 Modulo LED SITECO con Power LED e ottiche riflettenti

COB e ottica riflettente

Nel caso di sistemi a riflessione basati sull'impiego di COB, la modularità riduce le opzioni possibili: il numero di COB sarà 1 o 2 (non si può usare un solo COB perché si perderebbe il concetto di modularità, dal momento che al variare della potenza variano anche le dimensioni della superficie emittente e quindi l'ottimizzazione del riflettore risulterebbe difficoltosa) e a seconda del design utilizzato, si avrà un "modulo"

con uno o due LED accoppiati ad un'ottica riflessiva. L'integrazione del sistema di alimentazione al modulo non sembra conveniente e il sistema dissipazione non potrà essere unico per l'intero apparecchio.

Scalabilità : sulla base di questo concetto deve poter essere possibile ridurre il numero di LEDs impiegati (riesce molto bene con le soluzioni Power LED) in funzione della categoria illuminotecnica piuttosto che i valori della corrente di alimentazione a parità del numero di semiconduttori impiegati (una voce di costo importante nel prodotto è data dalle sorgenti, se vario la corrente di alimentazione attraverso una riprogrammazione della logica di controllo, non ottengo alcun risparmio economico).

Anche in questo caso, il frazionamento della potenza elettrica per i COB, consente di avvicinarsi al caso precedente, ma comporta maggiore manodopera e forse maggiori costi nella versione con le prestazioni migliori.

Efficienza : risulta il punto chiave del progetto e dipende essenzialmente da tre aspetti:

1. Efficienza delle sorgenti LEDs impiegate: i Power LED offrono ad oggi una maggiore efficienza rispetto ai COB. Non occorre però dimenticare che anche la disponibilità di lenti free-form rappresenta un aspetto da non trascurare: LED molto recenti sul mercato potrebbero ridurre le opzioni sul numero di lenti disponibili
2. Efficienza del sistema ottico, sia esso una lente free-form o un sistema a riflessione. In linea generale, si può affermare che le lenti free-form offrano una maggiore possibilità di controllo del flusso luminoso rispetto alle ottiche a riflessione. Qualche costruttore propone soluzioni miste composte da un'ottica free-form per il controllo del flusso luminoso in senso longitudinale alla strada e riflettore per il controllo della distribuzione in senso trasversale.
3. Efficienza termica, intesa come la capacità del sistema di dissipare in maniera efficace il calore prodotto alla giunzione. Questo aspetto è, in genere, un compromesso tra diverse esigenze tra cui quella di contenere i pesi, gli ingombri e costi (essenzialmente dovuti al materiale) e quella di non penalizzare eccessivamente le prestazioni dell'intero sistema. Mentre nei sistemi Power LEDs il calore risulta distribuito sull'intera PCB e i picchi di temperatura possono essere abbastanza contenuti tramite una disposizione oculata dei componenti, nel caso dei COB si deve smaltire una quantità di calore sensibile localizzata su una superficie limitata. Dal momento che le performance e la durata (intesa come decadimento del flusso luminoso al crescere delle ore di funzionamento) sono aspetti essenziali del progetto, occorre dedicare particolare attenzione a questo elemento nel corso del progetto, garantendo che la temperatura nel test point T_p si mantenga nell'intorno di valori di sicurezza.

Comfort : questo aspetto prescinde dal rispetto dei requisiti di abbagliamento presenti nella norma UNI EN 13201: si tratta di valutare quella sensazione fastidiosa e molesta dovuta al fatto che i livelli di illuminamento in esterni sono relativamente bassi, mentre le componenti dell'apparecchio, quali ad esempio lampade e superfici riflettenti³, tendono ad essere molto brillanti (abbagliamento molesto).

Senza entrare in considerazioni circa i metodi di valutazione di tale effetto e sui meccanismi fisiologici che lo determinano, si può affermare che soluzioni che impiegano Power LED e lenti free-form sono meno confortevoli rispetto a quelle soluzioni che impiegano riflettori e COB nel caso in cui il funzionamento dell'apparecchio avvenga per emissione completamente indiretta.

Di norma questo parametro viene considerato in installazioni dove l'utente prevalente è il pedone, nei casi in cui il confort visivo è un requisito altamente desiderabile per compito visivo dell'utente. Alcune soluzioni

³ L'utilizzo di sorgenti Power led, a causa della ridotta dimensione ($1-2\text{mm}^2$) delle superficie emittente e dell'elevato valore del flusso emesso, tendono ad esasperare il fenomeno descritto raggiungendo valori di luminanza pari a cd/m^2

basate su moduli LED a fosfori remoti (che costituiscono una sorgente estesa) sono state sviluppate da alcuni costruttori, per le installazioni dove il confort è prioritario su ogni altra esigenza⁴.



Figura 7 Apparecchio di illuminazione che utilizza una sorgente a fosfori remoti (PHILIPS Fortimo)

Non si tratta di soluzioni particolarmente efficienti (82 lm/W è quanto dichiara Philips per il suo Fortimo LED Linear Module, con un indice di resa cromatica pari a 70) ed è per questo motivo che non verranno considerate nel presente lavoro di ricerca.

Richiamo stilistico alle linee dell'apparecchio ENEA PLUS realizzato nel corso del precedente progetto di ricerca: l'obiettivo è di difficile realizzazione per la soluzione basata su COB e ottica riflettente.

La precedente realizzazione era caratterizzata da spessori ridotti, resi possibili dall'impiego di lenti free-form; l'impiego di un riflettore in abbinamento ad una sorgente estesa comporta la necessità di abbracciare un angolo solido sufficientemente ampio affinché la luce sia indirizzata nella direzione desiderata e questo comporta necessariamente la creazione di un sistema dotato di una certa profondità.

COB e ottiche riflettenti

Sono state individuate tre possibili soluzioni per la realizzazione del sistema ottico, riportate nelle figure seguenti. La scelta tra i vari schemi proposti deve tenere conto dei seguenti aspetti:

- Efficienza ottica del sistema, in funzione della quantità di flusso controllato dall'ottica della distanza della sorgente dal profilo riflettente che ne determina la capacità di controllo.

Nel caso si decidesse di utilizzare 4 sorgenti con 2 sistemi ottici (vedi disegno della soluzione 03), lo schema più semplice ed efficace è quella di realizzare due ottiche identiche, cioè che realizzino la stessa distribuzione fotometrica. La scomposizione della distribuzione fotometrica target in due o tre distribuzioni parziali è possibile, ma richiede la progettazione di sistemi ottici completamente differenti con un aggravio di costi e di tempi.

La soluzione 01 prevede la progettazione di un'ottica capace di realizzare distribuzione fotometrica necessaria al raggiungimento dei requisiti della categoria illuminotecnica ME3a (in termini di uniformità generale e longitudinale), mentre il valor medio della luminanza sulla carreggiata deriverebbe dalla sovrapposizione dell'emissione di diverse ottiche identiche.

La soluzione 02 prevede il posizionamento dei LED ai lati del riflettore, in analogia a quanto accade ad alcuni prodotti già presenti sul mercato: le sorgenti sarebbero invisibili all'osservatore, garantendo un elevato confort, ma si perderebbe la facilità della scalabilità del prodotto (a parità di

⁴ Ci si riferisce soprattutto all'efficienza ottica dell'apparecchio. Un altro impiego di questa soluzione è nella realizzazione di apparecchi LED retrofit di prodotti esistenti ("This makes Fortimo LLM a truly future-proof solution, enabling luminaire manufactures to adapt existing luminaires and design new products with confidence..").

distribuzione fotometrica) in quanto l'ottica complessiva dovrebbe essere scomposta in una serie di compartimenti identici allineati tra loro lungo la direzione trasversale alla strada. L'apparecchio risultante sarebbe alquanto ingombrante ; la soluzione alternativa prevede di ospitare più LEDs all'interno di un unico sistema ottico, che dovrebbe essere ottimizzato considerando più sorgenti (maggiore difficoltà) e comunque le prestazioni, in termini di efficienza, non potrebbero essere ottimali nel caso di impiego del numero minimo e massimo numero di sorgenti.

- Numero delle sorgenti impiegate, che deve tenere conto della quantità di flusso necessario al raggiungimento delle specifiche della classe illuminotecnica ME3a e offrire la necessaria flessibilità al sistema (per esempio nel caso di riduzione del requisito di luminanza media si potrebbe agire diminuendo la corrente di alimentazione dei LED, oppure, si potrebbe eliminare una coppia di LED e riconfigurare la corrente di alimentazione nei rimanenti, che comunque godrebbero di un sistema di dissipazione progettato per il massimo carico termico).

Occorre anche valutare la possibilità di utilizzo di driver con correnti di alimentazione standard (700 mA- 1000 mA) rispetto a soluzioni realizzate custom; nel primo caso si ha la possibilità di ridurre i costi⁵, nel secondo si ha il vantaggio di progettare una sistema di maggiore efficienza energetica.



Figura 8 Soluzione riflettente 01

⁵ I maggiori costi possono derivare dalla necessità di progettare ex-novo il driver, di verificarne l'affidabilità (MTBF) e di certificare rispetto alle norme vigenti il nuovo prodotto.

In questa scelta entrano necessariamente anche considerazioni di tipo economico sia per l'acquisto delle componenti (diverso costo delle diverse tipologie di LED, dei driver di alimentazione, delle dimensioni del prodotto), sia per quanto riguarda risparmi nella fase di montaggio

- Efficienza termica, alcune soluzioni rendono più difficile la progettazione di un sistema di dissipazione efficiente, che riesca a garantire i valori di temperatura di giunzione adatti per l'applicazione. Ad esempio la soluzione 02 costringe a duplicare il sistema di alimentazione ai due lati dell'apparecchio, con possibili aumenti dei costi e delle dimensioni del prodotto; la soluzione 01 è la più semplice da questo punto di vista, anche se impone qualche vincolo formale al design dell'apparecchio complessivo.

La soluzione 03 rappresenta il caso più innovativo dal punto di vista della dissipazione in quanto si deve evitare che i COB sui due lati opposti del supporto si riscaldino a vicenda riducendo le prestazioni del sistema e accelerando il processo di decadimento del flusso luminoso nel tempo.

- Estetica del prodotto, riduzione dei pesi e delle quantità di alluminio necessarie alla realizzazione della scocca, riduzione degli ingombri.



Figura 9 Soluzione ottica 2

Per quanto riguarda la possibilità di modificare la distribuzione fotometrica del prodotto (possibilità offerta dal PLUS precedente), con un meccanismo spostamento relativo tra sorgenti e riflettore, impone vincoli molto forti alla progettazione del sistema ottico⁶ e dell'intero apparecchio; questa soluzione è risulta facilmente percorribile con un sistema con Power LED e lenti free form, dove la scelta delle distribuzioni delle lenti e la loro proporzione all'interno del progetto, possono essere sfruttate per la modifica delle distribuzione fotometrica dell'intero apparecchio.

⁶ Alcune delle soluzioni di design ottico sono più adatte al perseguimento di questo obiettivo rispetto ad altre.



Figura 10 Soluzione ottica 03

Esame soluzioni ottiche possibili

Nel seguito verranno esaminate alcune delle soluzioni ottiche disponibili sul mercato (come semilavorato o prodotto finito) al fine di trarne alcune considerazioni tecniche per lo sviluppo del prodotto.

Nactus di Khatod

Sistema costituito da 48 Power LEDs e lenti free-form capaci di soddisfare i requisiti della classe ME3a, supponendo che il flusso uscente dall'apparecchio sia pari a 11000 lm. Il costruttore suggerisce di alimentare i LEDs a 700 mA, utilizzando delle sorgenti con una temperatura correlata di colore di 5000K. Il consumo dichiarato del sistema risulta pari a 110 W.

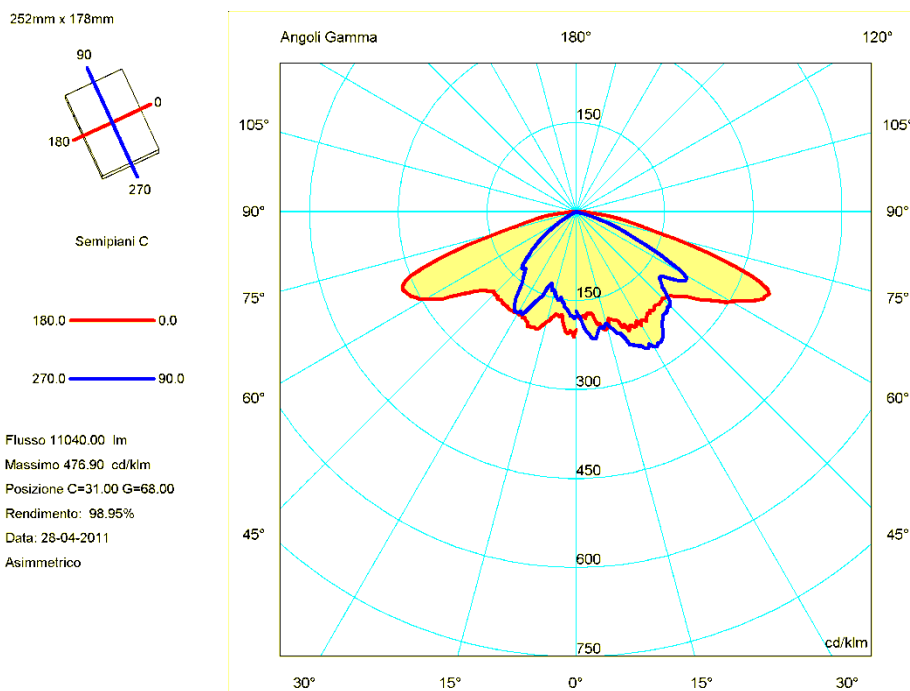


Figura 11 Indicatrici di emissione del sistema ottico NATCUS nei piani C0-180° e C90-270° (dati forniti da Khatod). La geometria di impianto adottata dal costruttore per la verifica delle prestazioni è la seguente:

- H (Pole Height): 8m
- BOOM (Boom Length): 0m
- RW (Road Width): 8m
- P2P (Pole to pole distance): 3.75xH

I risultati impiantistici ottenuti sono:

- Lave (Average Luminance): 1,10
- UO (Overall Uniformity): 0,50
- UI (Longitudinal Uniformity): 0,80

Purtroppo non è dato sapere il modello del LED utilizzato (particolarmente interessanti sono i valori di tensione ai capi della giunzione, flusso emesso alla corrente di 700 mA e per una prefissata temperatura di giunzione), né se i valori indicati rispetto al flusso emesso si riferiscono alla temperatura ambiente o a valori più elevati della temperatura di giunzione. Il sistema consente di realizzare in modo semplice un gruppo ottico IP 65⁷. Non è dato conoscere se la fotometria pubblicata sul sito del costruttore tenga conto o meno dello schermo di chiusura piano.



Figura 12 Sistema ottico Nactus 48 LED KNAC4801A_2

⁷ Il desiderato grado di protezione contro l'ingresso di polvere e liquidi potrebbe essere ottenuto studiando opportunamente l'accoppiamento tra le lenti, stampate in un sol o componente e il supporto/dissipatore su cui è fissato il MCPCB con le sorgenti LEDs.

Dai dati forniti, si deduce che ciascun LED dovrà contribuire con un flusso di circa 230 lm alla corrente di 700mA; il consumo dichiarato dal costruttore è pari a 110 W, ma anche in questo caso non è precisato in quali condizioni sia ottenuto (per esempio, se comprensivo di perdite sull'alimentatore, a quale valore di corrente, ecc).

Questo significa che considerando ad esempio un Power LED Rebel ES da Cool White 5650 K (LXML-PWC2), con flusso luminoso tipico di 235 lm a 700 mA e temperatura del pad di 25 °C, la potenza assorbita dalla scheda risulta maggiore di $0.7 \times 3.0 \times 48 = 100.8$ W in quanto occorrerà alimentare il sistema con una corrente maggiore al fine di compensare la riduzione di efficienza dovuta alla temperatura di giunzione.

Nominal CCT/ Color	Part Number	Typical Luminous Flux (lm) @ 350 mA Forward Current	Typical Luminous Flux (lm) @ 700 mA Forward Current	Typical Luminous Flux (lm) @ 1000 mA Forward Current
4100K Neutral-White	LXPL-PWN2	130	230	310
5650K Cool-White	LXML-PWC2	135	235	320
2700K	LXW9-PW27	75	135	184
3000K	LXW9-PW30	81	145	197
3500K	LXW8-PW35	103	185	252
4000K	LXH7-PW40	114	205	279
4000K	LXW8-PW40	106	190	258
5000K	LXW8-PW50	111	200	272

Figura 13 Flussi luminosi tipici per LED REBEL ES, per correnti di alimentazione di 350mA,700mA,1000 mA e thermal Pad 25°C

Table 4.

Nominal CCT/ Color	Part Number	Forward Voltage V_f (V)			Typical Temperature Coefficient of Forward Voltage $^{(1)}$ (mV/°C) $\Delta V_f / \Delta T_f$	Typical Thermal Resistance Junction to Thermal Pad (°C/W) $R_{\theta_{jc}}$
		Min.	Typ.	Max.		
4100K Neutral-White	LXPL-PWN2	2.5	3.0	3.5	-2.0 to -4.0	6
5650K Cool-White	LXML-PWC2	2.5	3.0	3.5	-2.0 to -4.0	6
2700K	LXW9-PW27	2.5	3.0	3.5	-2.0 to -4.0	6
3000K	LXW9-PW30	2.5	3.0	3.5	-2.0 to -4.0	6
3500K	LXW8-PW35	2.5	3.0	3.5	-2.0 to -4.0	6
4000K	LXH7-PW40	2.5	3.0	3.5	-2.0 to -4.0	6
4000K	LXW8-PW40	2.5	3.0	3.5	-2.0 to -4.0	6
5000K	LXW8-PW50	2.5	3.0	3.5	-2.0 to -4.0	6

Notes for Table 4:

1. Philips Lumileds maintains a tolerance of ± 0.06 V on forward voltage measurements.
2. Measured between $25^\circ\text{C} = T_f = 110^\circ\text{C}$ at $I_f = 700$ mA.

Figura 14 Caratteristiche elettriche del LED Rebel ES, rilevate a 700 mA e per temperatura del pad di 25°C

Per maggiori dettagli, si veda il risultato delle prove fotometriche (punto C3 dell'allegato tecnico), condotte su un prototipo di studio che adotta questo sistema ottico.

TLED SL-CX02

Si tratta di un costruttore italiano di lenti free-form per LED CREE XPG adatte a realizzare un apparecchio in classe ME3a, adottando il seguente schema di installazione :

- Larghezza della carreggiata : 8 m
- Corsie : 2
- Altezza di installazione : 8 m
- Interdistanza : 33.6 m (4.2 H)
- Inclinazione : 0°
- Sbraccio : 0 m
- Fattore di manutenzione : 0.8
- Flusso luminoso : 11500 lm

Il sistema garantisce le seguenti prestazioni :

- Luminanza media (Lm) : 1 cd/m²

- Uniformità generale (U0) : 0.58
- Uniformità longitudinale : 0.72
- SR : 0.68
- TI% : 13.3%

Il sistema è un modulo formato da 4 lenti, le cui dimensioni sono approssimativamente 45x39 mm con un'altezza massima della lente di 6.51 mm. Per maggiori dettagli circa gli ingombri, si rimanda alla Figura 15.

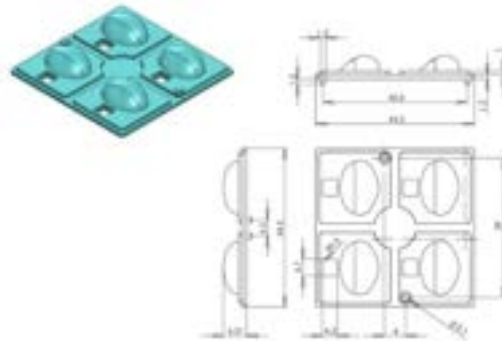


Figura 15 Dimensioni del sistema ottico TLED SL-CX02

Le indicatrici di emissione del sistema ottico, nei semipiani C0-180°, C90-270 e nei semi-piani C contenenti la massima intensità, sono riportate alla Figura 16.

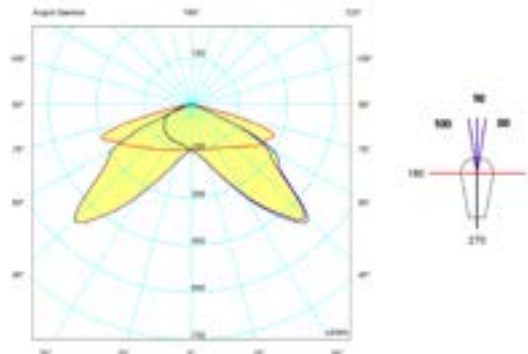


Figura 16 Indicatrici di emissione della lente TLED SL-CX02

Per maggiori dettagli, si veda il risultato delle prove fotometriche (punto C3 dell'allegato tecnico), condotte su un prototipo di studio che adotta questo sistema ottico.

TLED SL-CM01

Si tratta di una lente di produzione TLED progettata per il Power LED CREE XML, adatta per applicazioni stradali, con i requisiti della categoria ME3a.

Lo schema applicativo suggerito da costruttore è il seguente:

- Larghezza della carreggiata : 8 m
- Corsie : 2
- Altezza di installazione : 8 m
- Interdistanza : 32.0 m (4.2 H)
- Inclinazione : 0°
- Sbraccio : 0 m
- Fattore di manutenzione : 0.8
- Flusso luminoso : 11200lm

Il sistema garantisce le seguenti prestazioni :

- Luminanza media (Lm) : 1 cd/m²

- Uniformità generale (U0) : 0.46
- Uniformità longitudinale : 0.77
- SR : 0.64
- TI% : 12.8%

Le dimensioni della lente sono approssimativamente 22x22 mm con una altezza massima di circa 6.5 mm; maggiori dettagli sulle dimensioni sono riportati alla Figura 17.

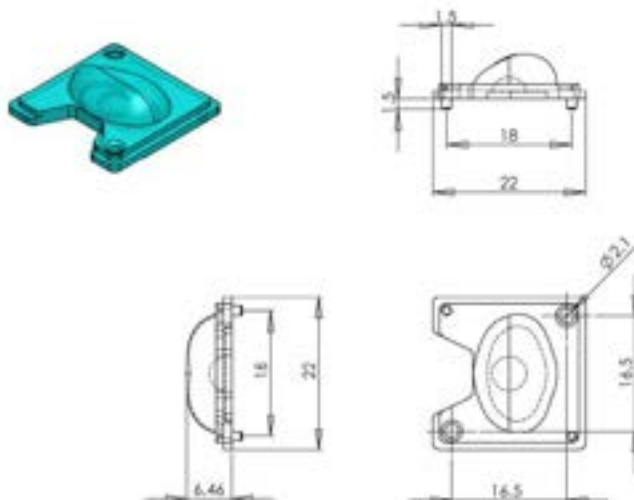


Figura 17 Dimensioni della lente TLED-SL-CM01

Le indicatrici di emissione del sistema ottico, nei semipiani C0-180°, C90-270° e nei semi-piani C contenenti la massima intensità, sono riportate alla Figura 18.

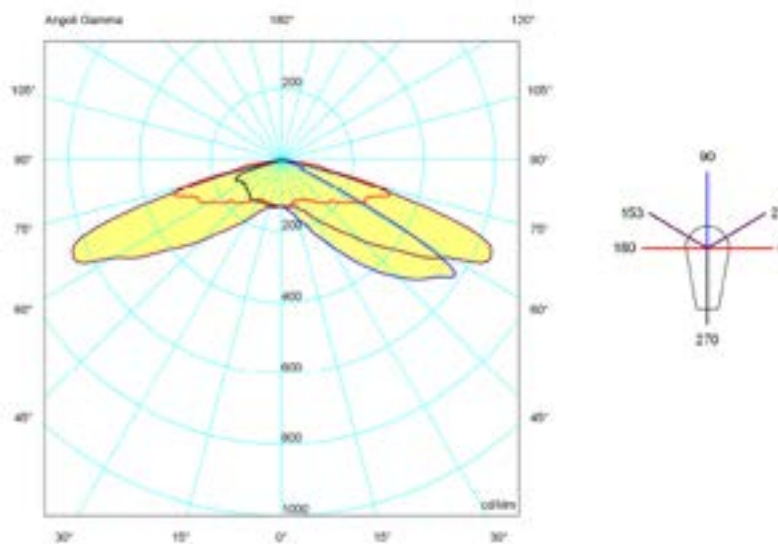


Figura 18 Indicatrici di emissione della lente SL-CM01 nei semipiani C0-180°, C90°-270° e nei due semi-piani C153 e C27° contenenti la massima intensità

A seguito del contatto con il produttore, sono disponibili i file fotometrici per la verifica impiantistica in altre condizioni di installazione.

[FRAEN F2L3-1-RE](#)

Questo costruttore propone una soluzione ibrida costituita da una lente free-form per il controllo del flusso luminoso in senso longitudinale alla carreggiate e di un'ottica riflettente per il controllo in senso trasversale. Il sistema proposto è disponibile per i Power LED maggiormente diffusi sul mercato : Lumileds Rebel, Rebel ES, CREE XP-G e XP-E, Seul Semiconductor Z5 e OSRAM Oslon SSL 150.

Il sistema, adatto a realizzare sistemi di illuminazione per le classi ME, è modulare dove l'unità atomica è costituita da una serie di 3 LED (si veda la Figura 20), che devono essere opportunamente combinate per la realizzazione dell'apparecchio.

La distribuzione fotometrica è stata ottimizzata per il soddisfacimento dei requisiti illuminotecnici relativi alla classe ME3a; le indicatrici di emissione sui semipiani C0°-180° e C90°-270° sono riportati alla Figura 19 (dati forniti dal costruttore).

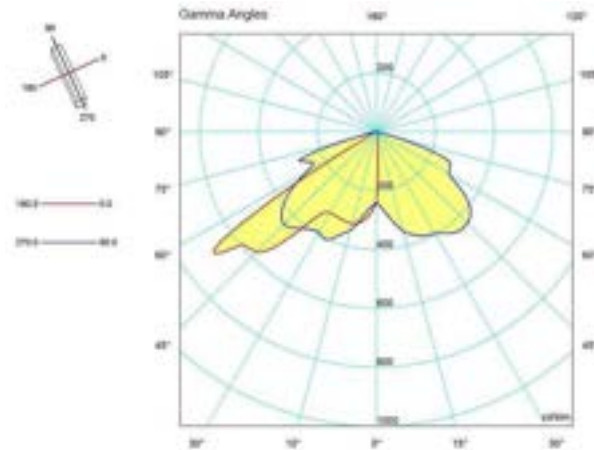


Figura 19 Indicatrici di emissione sistema ottico FRAEN F2L3-1-RE tracciate nei semipiani C0-180° e C90-270°.

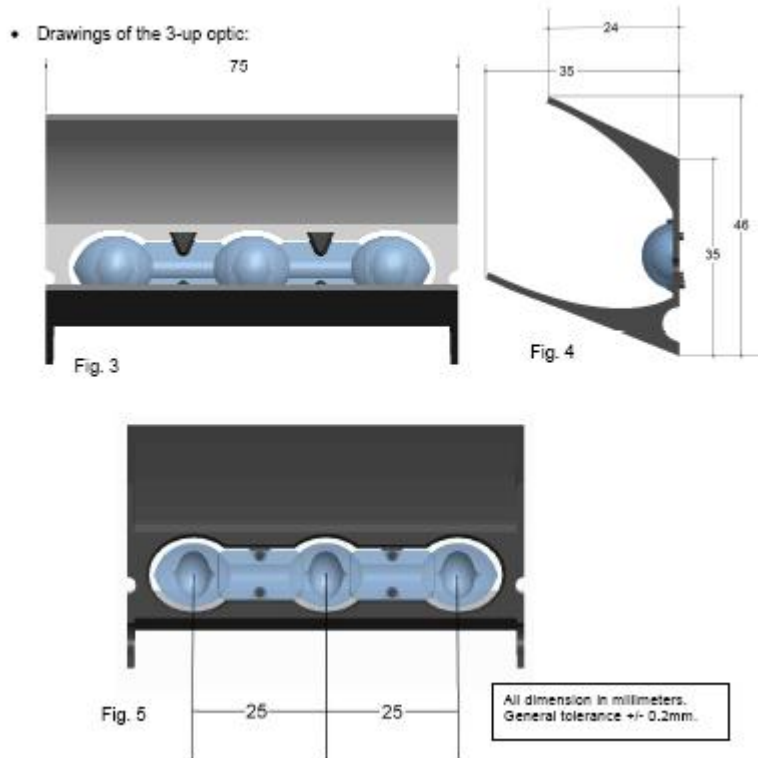


Figura 20 Modulo ibrido prodotto da FRAEN F2L3-1E adatto per LED REBEL ES.

Al fine di minimizzare la quantità di flusso che viene riflessa all'interno del sistema ottico da parte del vetro piano di chiusura, il costruttore suggerisce di lasciare dello spazio libero tra riflettore e schermo, secondo lo schema indicato alla Figura 21.

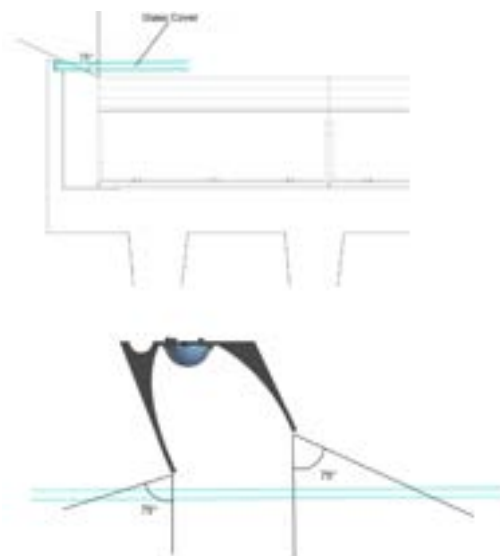


Figura 21 Particolare per la disposizione del vetro rispetto al modulo

Per una geometria di impianto $L/H=1$ e una inter-distanza pari a $4H^8$, i cui dettagli sono riportati alla Figura 22, il costruttore garantisce il soddisfacimento dei requisiti della classe ME3a utilizzando 72 led alimentati alla corrente di 550 mA (si suppone di aver a disposizione, per ciascun LED, 188 lm @550 mA per una $T_j=25^\circ\text{C}$), in modo tale che il flusso luminoso uscente dall'apparecchio sia pari a 9753 lm.

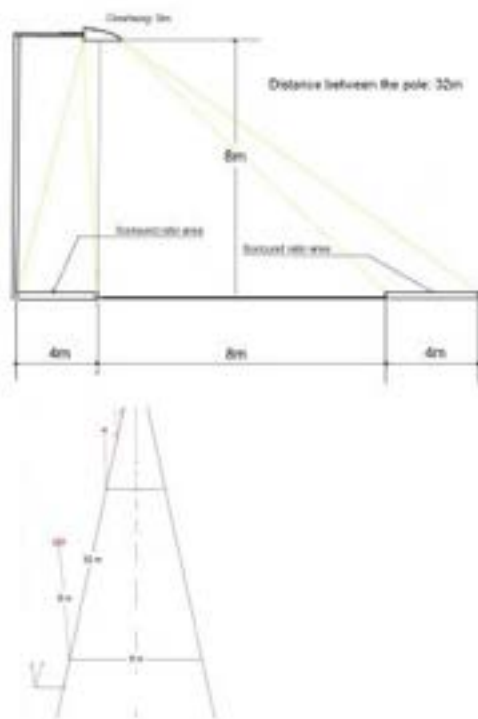


Figura 22 Geometria dell'impianto per la quale il costruttore fornisce i dati sulle performance ed il numero di moduli necessari

I risultati impiantistici ottenibili sono i seguenti:

⁸ Con il simbolo H si denota l'altezza di installazione espressa in metri, con L la larghezza della carreggiata (metri)

Road:	Single Road
Installation:	1 Side
Traffic divider:	1
Width:	8m
N. of carriageway	2
Asphalt:	CIE R3
High of the pole:	8m
Distance between pole:	32m
Maintenance factor:	0,8
Tilt angle:	0
Overhang:	0,6m
L average:	1
UL (min/max)	0,7
SR	0,5

Figura 23 Risultanze impiantistiche per l'installazione descritta (dati FRAEN)

Edison EMPW-C60MXRG-12X

Si tratta di un modulo pre-assemblato, composto da 12 LEDs di produzione Edison*12 montati su un metal core PCB e di una lente multipla adatta per la distribuzione stradale (cod. EMPW-C60MXRG-12X). Gli ingombri del sistema sono riportati alla Figura 24; risulta evidente che per il raggiungimento dei requisiti della classe ME3a occorrerà impiegare un numero di moduli compreso tra 8 e 10 (se occorrono 11500 lm emessi e ciascun modulo emette al massimo 1200 lm, riferito alla tonalità di 5600 K, il loro numero approssimativo si ottiene dividendo 11500 per 1200 lm).

EMPW-C60MXRG-121x

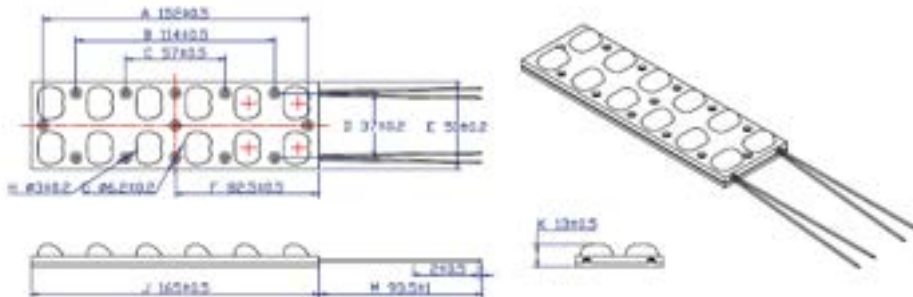


Figure 3. EMPW-C60MXRG-121x Module Dimensions
Note:
Unit: mm

Figura 24 Dimensioni del modulo EDISON WMPW-C60MXRG-12x

I dettagli sui massimi valori dei parametri di funzionamento (elettrici e fotometrici), sono riportati alla Figura 25: a tale proposito si osserva che il valore di corrente di 700 mA deriva dal parallelo di 2 rami costituiti da 6 LEDs ciascuno, che risultano quindi percorsi da 350 mA.

Absolute maximum ratings

Dimension	EMPW-C60KXRG-121xx EMPW-C60LXRG-121xx EMPW-C60MXRG-121xx
Light source	Edixeon*12
Total Flux	Cool White (5650K) 1200lm
Total Power	12W
Const Current Driver	700mA / 12W

Figura 25 Absolute maximum ratings

La connessione elettrica dei componenti è illustrata alla Figura 26: la connessione di due rami in parallelo è assai poco usata dai costruttori di LEDs perché costringe ad avere tolleranze sulla caduta di tensione molto strette.

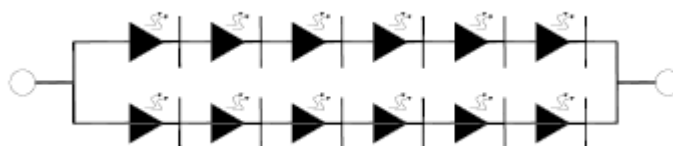
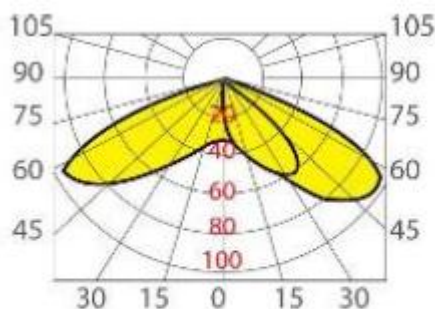


Figura 26 Connessione dei 12 LEDs, in due rami da 6 componenti ciascuno

Il sistema è alimentato alla corrente di 700 mA, con un consumo di 12 W circa; la distribuzione fotometrica ottenibile dal sistema è quella riportata alla Figura 27.



EMPW-C60MXRG-121x

Figura 27 Indicatrici di emissione modulo EMPW-C60NXRG-12X

Questo modulo era già stato analizzato nel corso del precedente progetto, quindi si dispone di un campione e della relativa misura.

Il principale vantaggio di questa soluzione riguarda la semplicità di assemblaggio del sistema, con conseguente riduzione di costi di produzione del prodotto; lo svantaggio è la scarsa flessibilità del sistema rispetto a soluzioni con lenti discrete, in cui è possibile ottimizzarne la disposizione, scegliere il Power LED da impiegare.

Soluzione power led+ ottiche

Questa soluzione è impiegata da alcuni costruttori nei loro prodotti con soluzioni custom e al momento non esistono semilavorati disponibili sul mercato.

Si cercherà di stimare l'efficienza di questa soluzione sulla base delle performance dell'apparecchio, ben sapendo che queste sono influenzate, oltre che dall'efficienza del LED e delle ottiche, anche dalla capacità del dissipatore di disperdere il calore nell'ambiente in modo efficiente e dalla performance del sistema di alimentazione.

Per le considerazioni che seguono è stato considerato un prodotto di costruzione AEC, in cui il sistema ottico è costituito da due riflettori in policarbonato metallizzato, ciascuno equipaggiato con un Power LEDs (Figura 28). Il grado di protezione IP66 del vano ottico è ottenuto mediante vetro piano temperato.



Figura 28 Sistema ottico Power LED e riflettori impiegato da AEC

La distribuzione fotometrica dichiarata dal costruttore è riportata alla Figura 29 (indicatrici di emissione sui piani C0-180° e C90°-270°), dove si osserva che il flusso emesso risulta pari a 12000 lm: per L/H=1 (larghezza/altezza di installazione), l'apparecchio indirizza circa il 50 % del flusso luminoso emesso sulla carreggiata e circa il 35% verso il marciapiede.

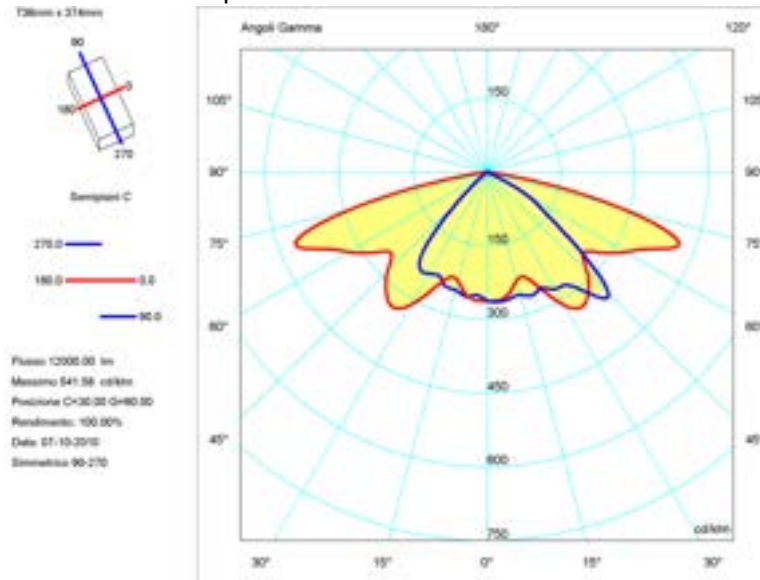


Figura 29 Indicatrici di emissione C0-180° e C90°-270° per l'apparecchio AEC PINT090225400_020°

Le sorgenti luminose impiegate sono 90 LEDs ad alta efficienza (130 lm/W - 350mA - $T_j=25^\circ\text{C}$) con temperatura correlata di colore 3950K e indice di resa cromatica CRI pari a 65. I LED sono disposti su circuiti stampati (metal core PCB) appositamente studiati e costituiti da uno strato di supporto in alluminio, uno strato di isolamento ceramico e strato conduttivo in rame, con uno spessore totale di 1.6 mm.

Ciascun LED risulta alimentato alla corrente di 525 mA e la potenza totale assorbita dal sistema risulta pari a 145 W; l'efficienza del sistema risulta quindi pari a $12000/145=82.7$ lm/W.

Supponendo che il sistema di alimentazione abbia una efficienza del 90%⁹, si ha che la potenza sui LED risulta pari a circa 130 W, e quindi il valore di efficienza del sistema ottica + dissipatore raggiunge circa 92 lm/W.

Un altro esempio di questo tipo è rappresentato da DEFLECTO, prodotto da Arianna che utilizza dei Power LED e un sistema ottico a riflessione: l'apparecchio disponibile in varie versioni a seconda della categoria illuminotecnica desiderata, secondo il costruttore, consente di raggiungere i requisiti delle categoria illuminotecnica ME3a con 64 LEDs.

Il sistema ottico è realizzato in policarbonato metallizzato sotto vuoto e funziona in accoppiamento con un vetro piano temperato con trasmittanza del 92.5%, oppure con vetro piano con caratteristiche ottiche, che consente di raggiungere valori di trasmittanza più elevati, pari al 97% circa.

L'apparecchio è scalabile, nel senso definito all'inizio della presente relazione, ed è disponibile in 6 differenti configurazioni (da 16 LEDs ad un massimo di 64 LEDs), in funzione della categoria illuminotecnica della strada da illuminare (zone destinate al traffico veicolare, aree pedonali o piste ciclabili).

⁹ I valori di efficienza dipendono dal tipo di alimentatore e dalla corrente di alimentazione: il valore del 90% indicato è quello raggiunto dalla maggior parte dei componenti di qualità in commercio



Figura 30 Sistema ottico impiegato per DEFLECTO

Con riferimento alla Figura 30, si osserva che i LED e il sistema di dissipazione è posto ai lati dell'area di emissione dell'apparecchio, mentre la zona centrale è occupata dall'ottica riflettente: il principale pregio di questa soluzione è quello di lasciare celati i Power LED, contribuendo in questo modo a ottenere un elevato grado di confort.

Da un punto di vista termico, il costruttore afferma che il prodotto è stato studiato e testato al fine di mantenere una temperatura di giunzione sotto gli 80°C; con una temperatura ambiente di 40°C, la temperatura massima raggiunta dai LED è di 67°C per una temperatura ambiente di 25°C e questo dovrebbe consentire una durata di almeno 50,000 ore di esercizio (dati dichiarati dal costruttore).

La distribuzione fotometrica (modello DEF64FF060AHGS) dell'apparecchio a 64 LEDs¹⁰, sulla base dei dati forniti dal produttore, è rappresentata alla Figura 31: dalle informazioni contenute nel file *.LDT si conclude che il flusso emesso dall'apparecchio è pari a 9487 lm, con un assorbimento di potenza elettrica (comprensiva delle perdite) pari a 120 W. L'apparecchio indirizza il 50% del flusso luminoso emesso sulla carreggiata e il 25% sul marciapiede, per un valore del rapporto tra altezza e larghezza della carreggiata pari all'unità.

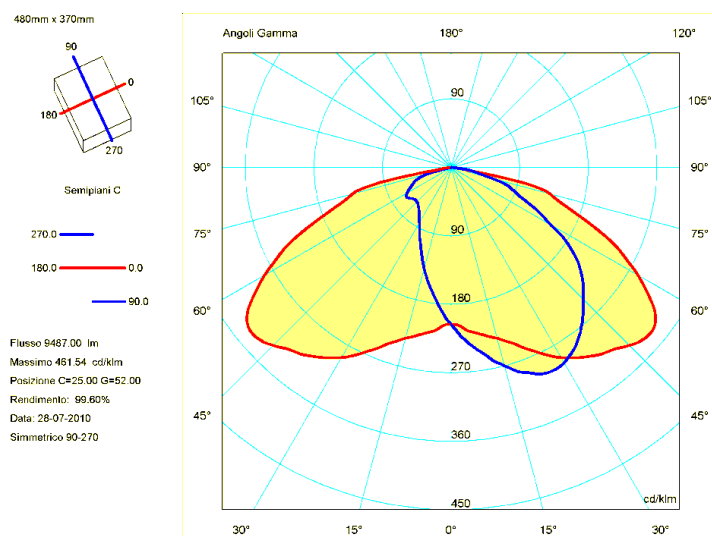


Figura 31 Indicatrici di emissione sui piano C0-180° e C90-270 per l'apparecchio DEF64FF060AHGS (ARIANNA)

¹⁰ Il costruttore afferma che questo apparecchio è adatto al raggiungimento dei requisiti impiantistici della classe ME3a in un impianto con centri disposti su una sola fila, alti 8 m sul piano stradale e interdistanza tra i pali pari a 30 m

I LED impiegati hanno temperatura di colore variabile tra 4000-6000K, con indice di resa cromatica tra 70-75.

DEFLECTO 64 LED		
DESCRIZIONE APPLICAZIONE APPLICATION DESCRIPTION	Sorgente per illuminazione di strade, autostrade, aree urbane, centri storici Light source for streets, highways, city areas, historical centers	
COMPOSIZIONE SISTEMA SYSTEM'S COMPOSITION	Corpo illuminante Lighting body	
CARATTERISTICHE ELETTRICHE ELECTRIC CHARACTERISTICS	Tensione Voltage Potenza assorbita Current consumption Rendimento alimentatore Power supply yield Frequenza di rete Frequency of the main	190 V ac > 264 V ac 119 W 92% 50-60 Hz
CARATTERISTICHE MECCANICHE MECHANICAL CHARACTERISTICS	Corpo Body Calotta esterna Cap Dimensioni Dimensions Peso totale Total weight Protezione richiesta Required protection	Alluminio stampato pressofuso EN46100 Die cast aluminum mould EN46100 Lamiere zincate imbutite Zinc coated deep-drawn metal sheet 387 x 587 x 285 mm 6,5 kg IP 66 classe II
	LED	Consumo elettrico Electric consumption Flusso luminoso Luminous flux Temperatura di colore Colour temperature CRI Angolo di emissione Emission angle
		1,71 W 130 - 139 lumen/tipo 4000k - 6000k 70 - 75 125°
PROIEZIONE LUCE 64 LED 64 LEDS LIGHT PROTECTION	Flusso totale nel semispazio Total flux in the half-space Efficienza luminosa nel semispazio Luminous efficiency in the half-space Temperatura operativa Operating temperature	7892 lumen 66,3 lumen/watt -20°C / +45°C
PRODOTTO BREVETTATO PATENTED PRODUCT		

Figura 32 Dati dichiarati dal costruttore (ARIANNA) relativamente al modello di apparecchio con 64 LEDs

L'efficienza dell'apparecchio, sulla base dei dati dichiarati dal costruttore è di 66.3 lm/W (Figura 32), considerando le perdite dell'alimentatore (9.6 W)¹¹, mentre l'efficienza, depurata dall'effetto del sistema di alimentazione è pari a $7892/1.71 \cdot 64 = 72.11$ lm/W. Anche in questo caso il costruttore non fornisce alcuna informazione circa la temperatura correlata di colore a cui si riferiscono i dati di efficienza riportati, ma con ogni probabilità i valori riportati sono relativi alla temperatura di 4000K, mentre il valore del flusso luminoso indicato alla Figura 31 si riferisce a quella più elevata (la diversa tonalità della luce comporta un "guadagno" del flusso luminoso emesso nell'ordine del 15-18% circa).

Un altro esempio di apparecchio realizzato combinando Power LED e ottiche riflettenti è Streetlight midi 10 LED di produzione SITECO: il sistema ottico è costituito da ottiche riflettenti in policarbonato alluminato sotto vuoto e chiuso da uno schermo in PMMA capace di garantire un grado di protezione IP 66.

¹¹ Il rendimento dichiarato per il sistema di alimentazione è pari al 92%



Figura 33 Sistema ottico SITECO Streetlight 10: particolare del riflettore

La distribuzione fotometrica dell'apparecchio (50506_70428) è riportata alla Figura 34: il flusso emesso è pari a 8800 lm (l'apparecchio è dotato di due moduli, ciascuno di 4400 lm), con un assorbimento di potenza elettrica di 113 W. Ne consegue che il valore di efficienza, tenuto conto anche del sistema di alimentazione, risulta pari a 77.9 lm/W.

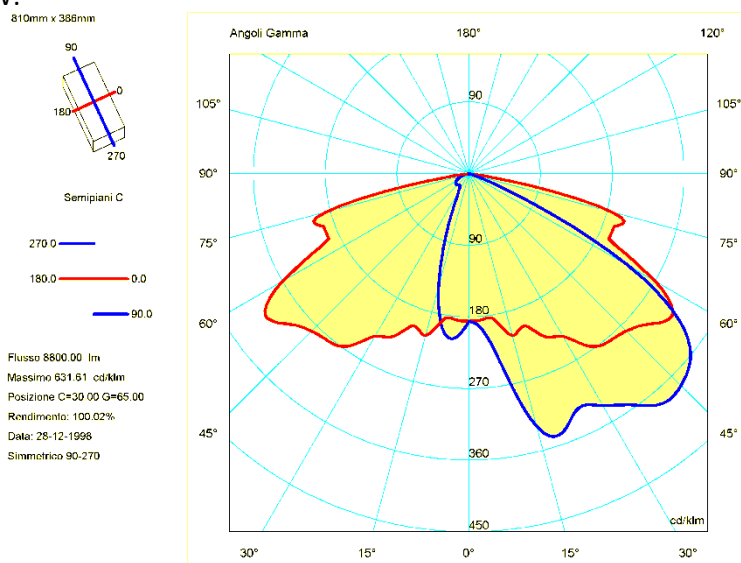


Figura 34 Distribuzione fotometrica apparecchio SITECO MIDI 10 LED (50506_70428)

Per valore unitario del rapporto tra larghezza della carreggiata e altezza di installazione, il sistema indirizza circa il 55% del flusso luminoso emesso verso la strada e circa il 15% verso il marciapiede.

Nessuna informazione circa la tonalità della luce, né relativa all'efficienza del sistema di alimentazione che risulta disponibile diverse versioni (modalità flusso costante, temporizzatore per la riduzione del flusso durante il funzionamento, controllo punto-punto delle funzionalità e dello stato dell'alimentatore attraverso la linea di alimentazione). Il costruttore sembra aver puntato maggiormente ad offrire diverse funzionalità piuttosto che su un dato di pura efficienza, che non fornisce per nessuna delle soluzioni proposte (Figura 35).



Figura 35 Sistema di alimentazione apparecchio SITECO

Il costruttore afferma che il sistema ottico è particolarmente efficiente nel contenere l'abbagliamento debilitante e quello molesto, dal momento che le sorgenti LEDs non sono visibili all'osservatore.

In sintesi, possiamo affermare che questa soluzione costruttiva, garantisce efficienze del sistema ottico e di dissipazione variabili tra i 72- 82 lm/W per sorgenti con temperatura correlata di colore di 4000K.

Il flusso emesso varia tra 12000 lm del prodotto AEC (in linea con le nostre previsioni e target iniziale) e i 9487 lm del prodotto REFLECTO 64 LED con un numero di sorgenti LEDs impiegate variabile tra 64 (DEFLECTO) e 90 (AEC PINT090225400_020).

OSRAM STREETlight Advanced - SLA1

Si tratta di un modulo LED (Figura 36) dotato di un sofisticato sistema ottico composto da una lente con fascio molto aperto e da un riflettore sviluppato per applicazioni di illuminazione urbana che dovrebbe garantire una illuminazione efficiente ed omogenea della superficie della carreggiata, del camminamento pedonale o della pista ciclabile.



Figura 36 Immagine del modulo OSRAM SLA1, specifico per l'illuminazione stradale

Il risultato illuminotecnico dipende essenzialmente dal comportamento asimmetrico della parte riflettente, che consente di ottenere in uscita dell'intero sistema un fascio asimmetrico di apertura 80°x140°.

Il modulo è progettato per una vita utile di 50000 ore (dato dichiarato dal costruttore), con un decadimento del flusso luminoso del 30% dopo tale periodo: questo dovrebbe garantire ampi intervalli tra una manutenzione e la successiva (se si suppone un funzionamento di 9 ore a notte, il valore di 50000 ore viene raggiunto dopo 15 anni di esercizio, in cui però dovranno essere previste delle manutenzioni per la pulizia delle parti ottiche dell'apparecchio, ma soprattutto l'impianto dovrà essere progettato con fattore di manutenzione pari a 0.7).

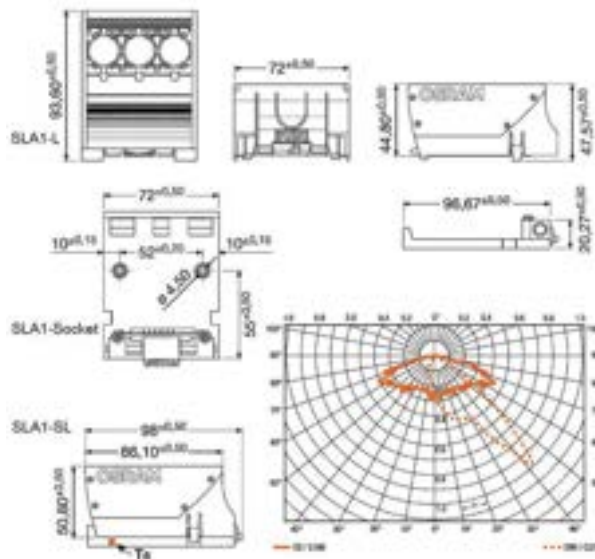


Figura 37 Ingombri e fotometria del singolo modulo

Le dimensioni del modulo (Figura 37) sono 72 mm x 98 mm x 51 mm, la lampada (cioè i LEDs) possono essere separati dal socket del modulo senza l’ausilio di attrezzi: questa particolarità, consente di ottenere, secondo il costruttore due vantaggi:

- La vita dell’apparecchio può essere molto lunga, nell’ordine dei 30 anni, in analogia a quanto accade per prodotti con lampade tradizionali
- L’utente può trarre beneficio dai miglioramenti di efficienza delle sorgenti luminose in corrispondenza degli interventi di manutenzione straordinaria, senza sostituire l’intero apparecchio

Il modulo è disponibile per differenti tonalità della luce, da 6000 K e indice di resa cromatica pari a 65, con un flusso di 1400 lm a modulo e con temperature di colore inferiori, maggiormente adatte al contesto urbano, pari a 3000 K e CRI 80 e di flusso luminoso di 1050 lm, supponendo una temperatura del base-plate di 35°C.

Il sistema è progettato per essere “scalabile” al fine di garantire la massima flessibilità in termini di altezza di installazione, interdistanza dei centri luminosi e larghezza della superficie da illuminare.

Ciascun modulo è alimentato a 24 V in corrente continua, con una potenza massima di 28 W, fornita da un alimentatore (OPTOTRONIC OT DALI 65) con protocollo DALI, disponibile dallo stesso costruttore.

L’efficienza del sistema non è elevata, infatti per ottenere 1430 lm a 6000K (Figura 38) occorre assorbire dall’alimentazione una potenza di 29 W, con una efficienza del sistema ottico di soli 50 lm/W.

Produkt	Farbe	Spannung [V DC]	Leistung [W]	Strom max. [A]	Abstrahlwinkel [°]	Farbtemp. [K]	Lichtstrom [lm]	Kabelquerschnitt [mm² / AWG]
SLA1-L-143-760-L80x140	weiß	24	29	1,21	80x140	6000	1430	- / -
SLA1-SL-143-760-L80x140	weiß	24	29	1,21	80x140	6000	1430	1,5 / 20
SLA1-L-123-742-L80x140	weiß	24	29	1,21	80x140	4200	1230	- / -
SLA1-SL-123-742-L80x140	weiß	24	29	1,21	80x140	4200	1230	1,5 / 20
SLA1-L-105-830-L80x140	weiß	24	29	1,21	80x140	3000	1050	- / -
SLA1-SL-105-830-L80x140	weiß	24	29	1,21	80x140	3000	1050	1,5 / 20
SLA1-Socket	-	-	-	10	-	-	-	1,5 / 20

*All Data are related to the entire module
 Due to the special conditions of the manufacturing processes of LED the typical data of technical parameters can only reflect statistical figures and do not necessarily correspond to the actual parameters of each single product which could differ from the typical data.
 *) Preliminary Data **) Empfohlener Kabelquerschnitt für den elektrischen Anschluss

Figura 38 Caratteristiche elettriche e luminose dei moduli

La Figura 39, mostra il numero di moduli necessari in funzione delle applicazioni e delle caratteristiche geometriche dell’installazione: nel nostro caso, il costruttore afferma che sono necessari 10 moduli per ottenere i requisiti di una ME3c con un impianto con centri luminosi su una fila alti 8 m sul piano della carreggiata, larghezza di quest’ultima pari a 8 m e interdistanza di 40 m. Il fattore di manutenzione è di

0.63, in accordo con la necessità effettuare un ricambio ogni 50000 ore, si suppone che considerando un fattore di manutenzione superiore pari a 0.8 (anticipando di conseguenza la manutenzione), il numero di moduli possa scendere da 10 a 8 (ciascun modulo dovrà avere un flusso luminoso di 1400 lm alla temperatura di colore di 6000 K).

Road type	Service road		Trunk road		Arterial road
Road layout [m] (mounting height, road width, luminaire spacing)	5 x 5 x 25	5 x 5 x 25	6 x 6 x 30	7 x 7 x 35	8 x 8 x 40
No. of modules per luminaire	1	2	4	6	10
Luminance [cd/m ²] ¹⁾	0.24	0.5	0.67	0.75	1
Illuminance [lx]	3.6	7.2	10	11.1	14
Achievable standard- compliant lighting classes	(ME6) S6 - S5	ME6 ME5 S6 - S3	(ME4b) ME5 S6 - S2	ME4b	ME3c
System wattage type [W] ²⁾	33	65	130	195	325

"STREETlight Advanced" is capable of successfully handling various lighting tasks.
¹⁾ 84% luminaire efficiency, maintenance factor MF = 0.63
²⁾ Luminaire with heat sink at 15 °C outside temperature

Figura 39 Numero dei moduli e prestazioni raggiunte in funzione della applicazioni e delle caratteristiche geometriche dell'installazione

L'impiego di un fattore di manutenzione così ridotto, impone la necessità di utilizzare un meccanismo che mantenga costante il flusso emesso nel tempo: l'apparecchio dovrà essere fortemente dimmerato ad impianto nuovo, in modo da garantire i valori della categoria illuminotecnica di progetto, con una aumento progressivo del flusso emesso man mano che l'impianto invecchia.

A tale comportamento dovrà essere sovrapposta la riduzione di flusso che si rende necessaria per adattare la categoria illuminotecnica di esercizio a quella di progetto, in dipendenza, ad esempio, di una riduzione del flusso di traffico nelle ore profonde della notte.

LEDIL STRADA DW e DN

Si tratta di una coppia di lenti (Figura 40) la cui emissione congiunta consente di ottenere una fotometria di tipo stradale; di norma vengono impiegate nella stessa proporzione e sono disponibili per un gran numero di LED (CREE XP-G, CREE XM-L, LUMILEDS REBEL ES, OSRAM OSLOM).

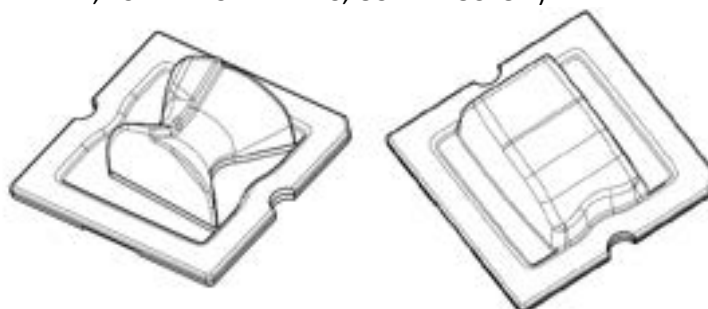


Figura 40 Lenti DW e DN (versione SQUARE) di produzione LEDIL

Queste ottiche, nella versione SQUARE TAPE, sono già state impiegate nel precedente progetto (ENEA PLUS) in accoppiamento con LED CREE XP-G.
 Per quanto riguarda la distribuzione fotometrica, i dati dichiarati dal produttore per entrambe le tipologie di lenti, sono riportati alla Figura 41 e alla Figura 42.

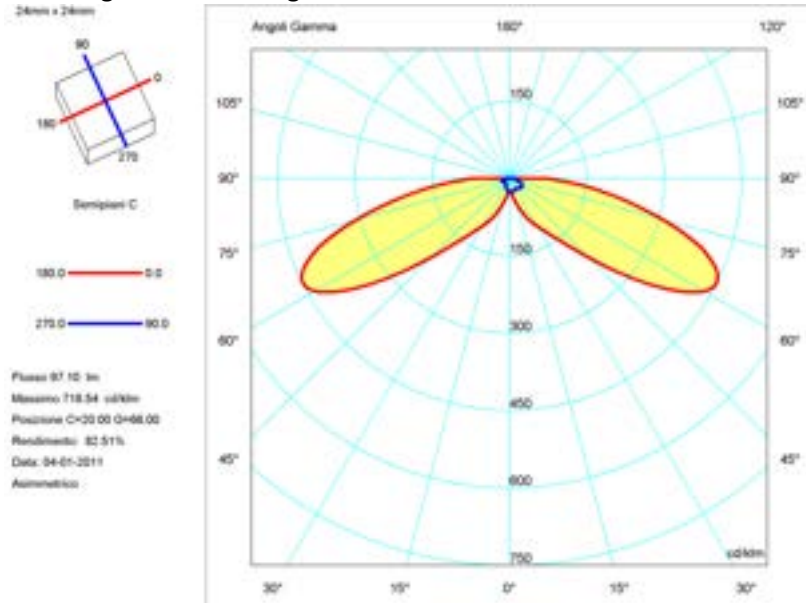


Figura 41 Distribuzione fotometria LENTE DW con led CREE XM-L (fonte:LEDIL)

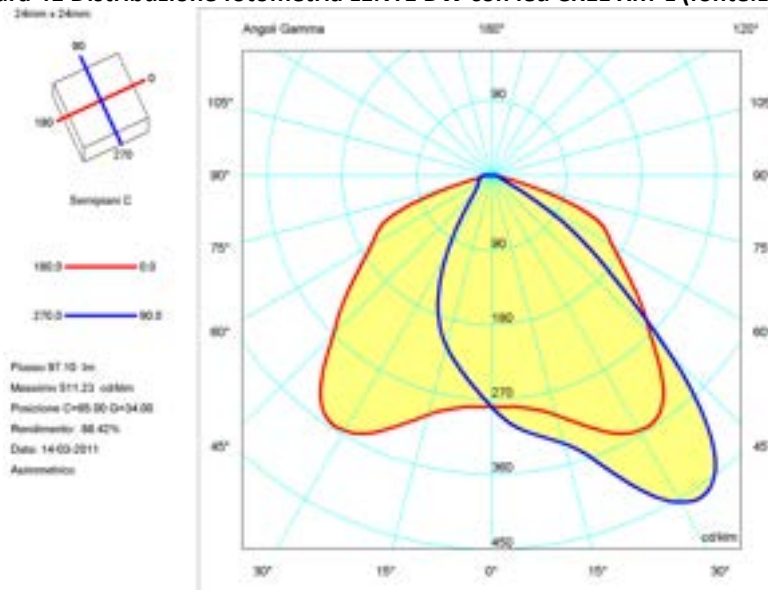


Figura 42 Distribuzione fotometria LENTE DN con led CREE XM-L (fonte:LEDIL)

Le efficienze delle lenti variano con il LED impiegato (in funzione delle dimensioni del cristallo del LED), ma sono in ogni caso piuttosto elevate: l'efficienza complessiva del sistema ottico dipenderà prevalentemente dalla disposizione delle lenti sul MCPB e dalle loro distanze reciproche che determinano un effetto di ombreggiamento reciproco tra le diverse componenti ottiche (Figura 43).

illuminated lens	shading lenses	light affected
Strada-SQ-T-DN	Strada-SQ-T-DN	1.5 %
Strada-SQ-T-DW-EU	Strada-SQ-T-DN	3.2 %
Strada-SQ-T-DW-US	Strada-SQ-T-DN	4.8 %
Strada-SQ-T-DN	Strada-SQ-T-DW-EU	5.7 %
Strada-SQ-T-DW-EU	Strada-SQ-T-DW-EU	19.0 %
Strada-SQ-T-DW-US	Strada-SQ-T-DW-EU	26.0 %

illuminated lens	shading lenses	light affected
Strada-SQ-T-DN	Strada-SQ-T-DW-US	4.4 %
Strada-SQ-T-DW-EU	Strada-SQ-T-DW-US	13.1 %
Strada-SQ-T-DW-US	Strada-SQ-T-DW-US	18.6 %

Figura 43 Ombreggiatura reciproca per le lenti LEDIL Strada DW e DN square per LED CREE XM-L (fonte: LEDIL)

La fotometria risultante dalla somma di quella relativa a ciascuna ottica è riportata alla Figura 44, in cui non è stato considerato nessun effetto di ombreggiatura dovuto alla vicinanza delle lenti.

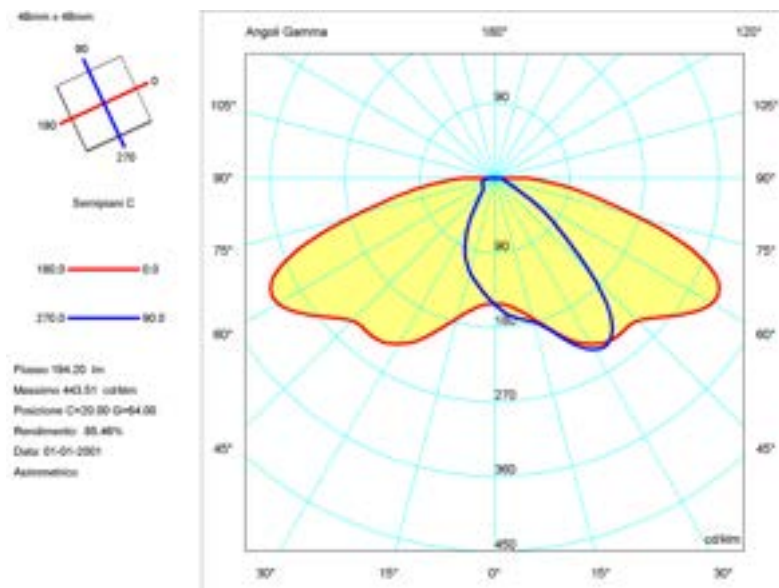


Figura 44 Somma delle fotometrie di lenti DW e DN adatte per LED CREE XM-L (elaborazione :Politecnico di Milano) LEDLINK

Si tratta di un produttore asiatico che si è affacciato sul mercato delle ottiche per lo street lighting con due nuovi prodotti:

- 1) Lente in policarbonato (LEV1700) LL01LU-AEV50150L appena rilasciata ed in fase di test presso il distributore e presso alcuni clienti per una conferma della prove di laboratorio del produttore LEDLINK (Figura 45). Il prodotto è stato sviluppato per Power LED Lumileds REBEL ES e CREE XPG Compliant per il soddisfacimento dei requisiti impiantistici della classe ME3a

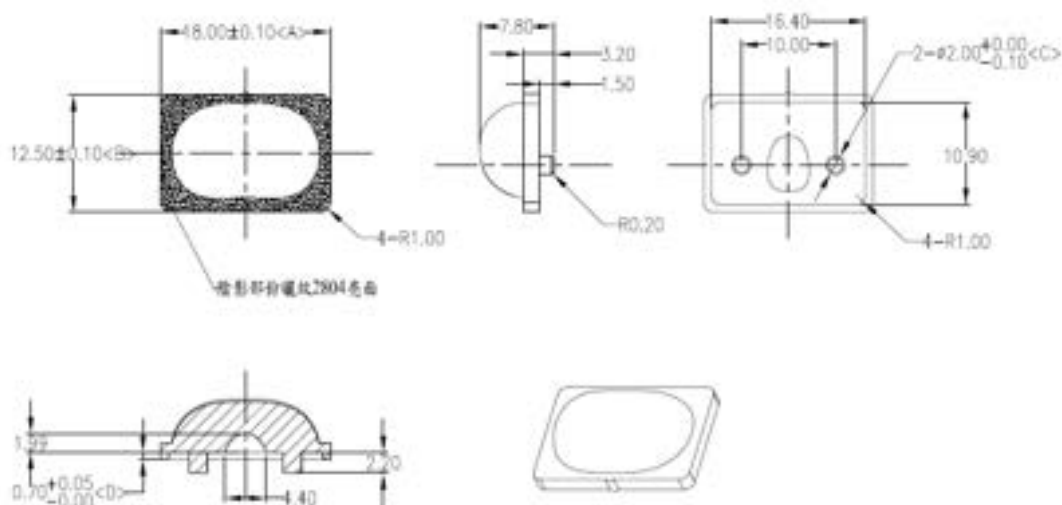


Figura 45 Dimensioni geometriche della lente LL01LU-AEV50150L

- 2) Lente "LPT616" (codice provvisorio) è stata sviluppata per LED LUXEON M (Multichip che recentemente introdotto nel mercato a breve ed attualmente in campionatura key customer)

soddisfacente i requisiti della classe ME3a e ME1 , ma con l’obiettivo del raggiungimento del valori previsti dalla classe ME2 (Figura 46). Sono disponibili dei campioni ma sono in corso delle ottimizzazioni per il raggiungimento del target. La stessa lente è anche in fase di test (alla riapertura R&D Taipei) con XM-L simile a Luxeon M ma di performance leggermente inferiori (anche se immediatamente disponibile).

Le caratteristiche tecniche dei LEDs Luxeon M (Figura 47), possono essere così riassunte¹²:

- More than 900 lumens at 700 mA and 85°C junction temperature
- Efficacy greater than 120 lm/W at 350 mA and 85°C junction temperature
- 12 Volt / 8 Watt package on AlN substrate
- three different CCTs, 3000K, 4000K, and 5700K each with specified minimum CRI of 70

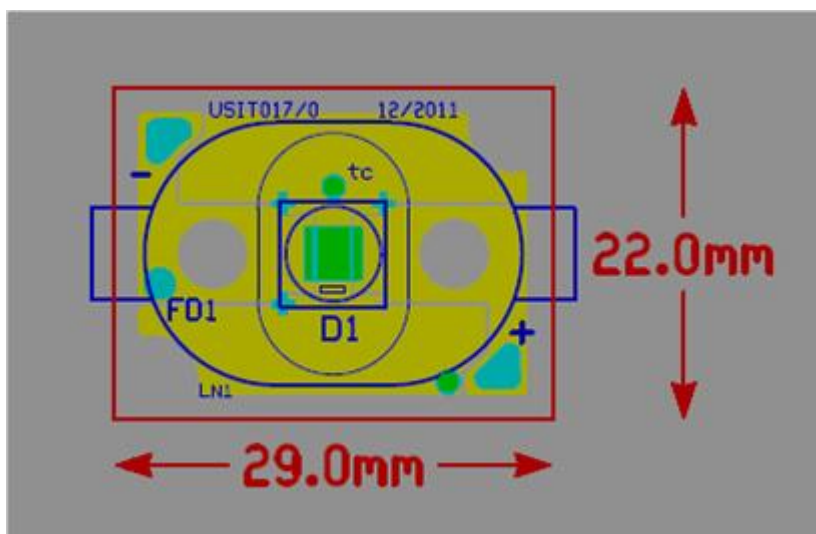


Figura 46 Dimensioni geometriche della lente “LPT616” per Lumileds LUXEON M

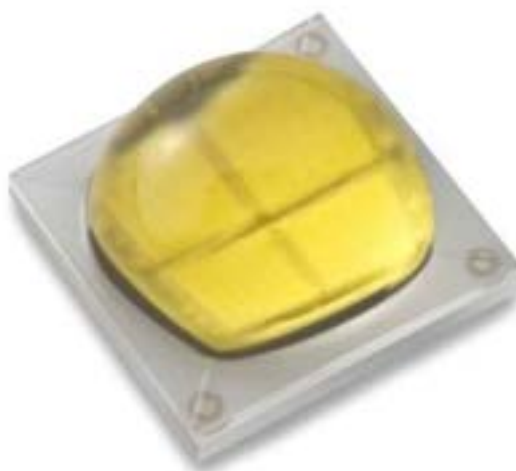


Figura 47 LED Lumileds Luxeon M, prossimamente disponibile sul mercato

Le dimensioni geometriche della lente LPT616 sono riportate alla Figura 46, mentre la distribuzione fotometrica è illustrata alla Figura 48.

¹² Led-Profesional, Jan 26, 2012 http://www.led-profesional.com/products/leds_led_modules/philips-lumileds-introduces-luxeon-m-for-outdoor-and-industrial-led-lighting-solutions

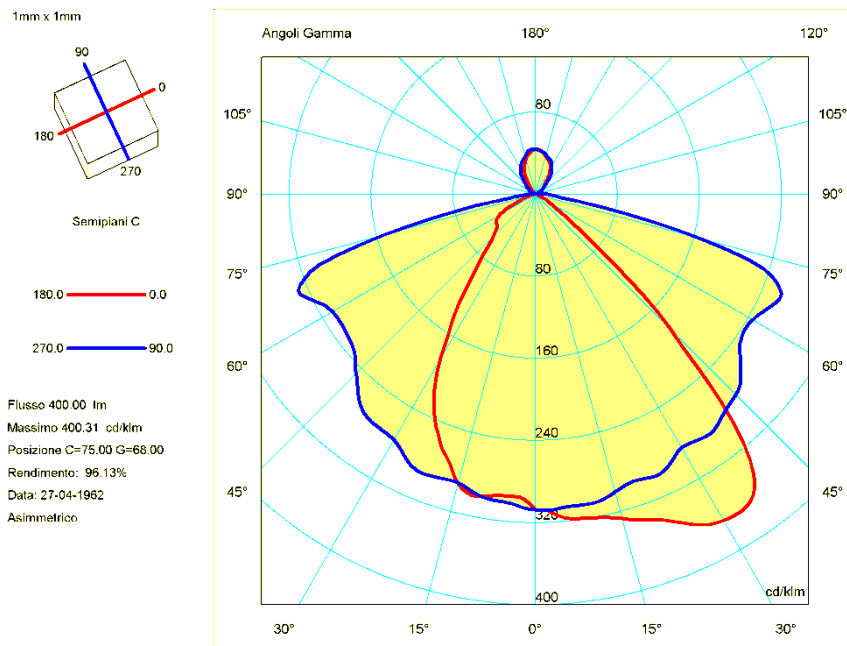


Figura 48 Distribuzione fotometrica della lente "LPT616" per Lumileds LUXEON M

La distribuzione fotometrica della lente LPT616 per il LED CREE XML è riportata alla Figura 49.

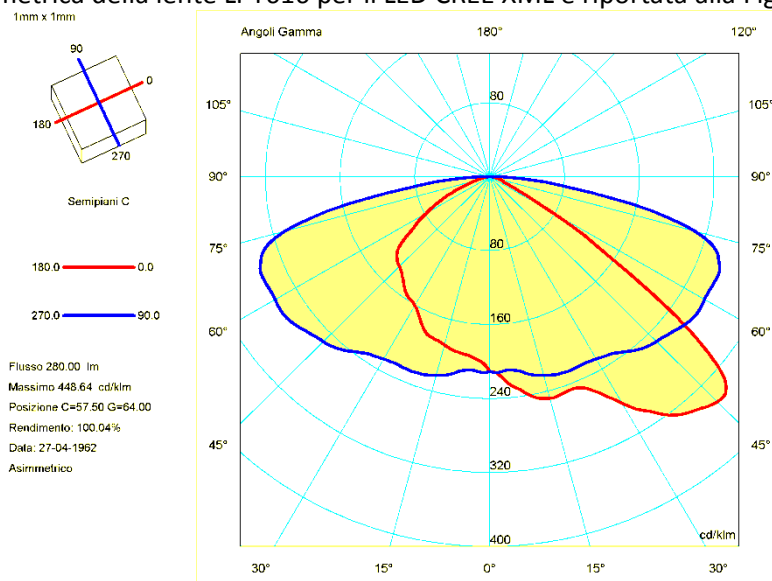


Figura 49 Distribuzione fotometrica della lente LPT616 per LED CREE XM-L

La soluzione con lente LPT6161 appare particolarmente interessante dal momento che fa uso di un LED array particolarmente performante e il target dichiarato della lente è il soddisfacimento dei requisiti delle categorie illuminotecniche ME1 e ME2, sino ad oggi esclusivo appannaggio delle lampade a scarica.

Geometria di impianto

Al fine di rendere confrontabili tra di loro le performance dei diversi componenti ottici selezionati e per la validazione del progetto, occorre definire una geometria di impianto sulla base dei requisiti geometrici per la costruzione delle strade, riportati dal Decreto Ministeriale 5 novembre 2001 n° 6792 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.

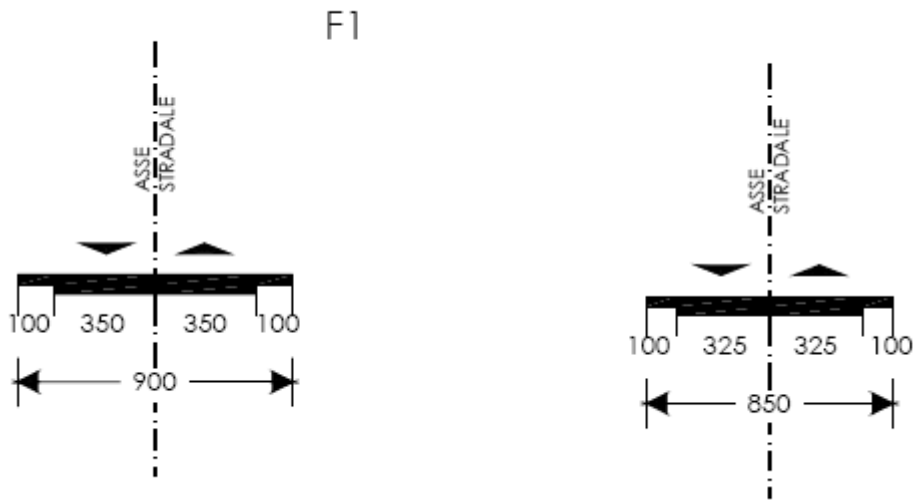


Figura 50 Caratteristiche geometriche per le strade classificate come F1 e F2 in extraurbano

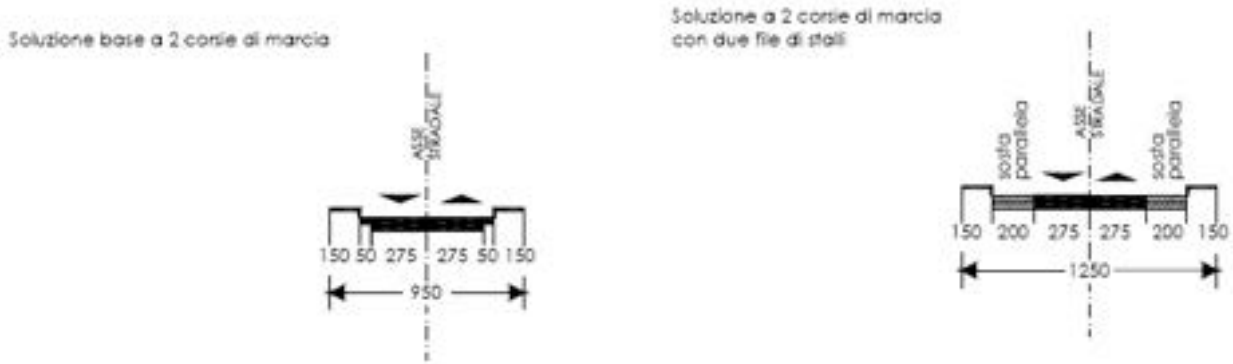


Figura 51 Caratteristiche geometriche per le strade classificate come F1 e F2 in ambito urbano

Dall'esame delle Figura 50 e Figura 51, possiamo desumere che la larghezza della strada sia circa 8.0 metri, per una installazione unilaterale dei centri luminosi e che i centri luminosi siano arretrati rispetto al bordo della sede stradale di circa 0.50 m, come previsto dal paragrafo 3.6.1¹³ della norma CEI 64-7 "Impianti elettrici di illuminazione pubblica".

Per quanto riguarda le altezze di installazione, si assume che debba essere rispettato il rapporto $L/H=1$, dove con L si indica la larghezza della carreggiata e con H l'altezza di installazione dei centri luminosi ; possiamo quindi supporre che i centri luminosi siano alti circa 8 m dal piano stradale.

L'interdistanza minima tra i centri di una fila deve essere pari ad almeno 3.7 volte l'altezza dei centri luminosi per il soddisfacimento da quanto previsto dalla maggior parte delle leggi regionali in termini di inquinamento luminoso e risparmio energetico¹⁴.

In assenza di informazioni specifiche e per avere il maggior grado di generalità possibile, si assume che le caratteristiche riflettenti del manto stradale, siano ben rappresentate dalla tabella C2 con chiarezza media della pavimentazione $Q_0=0.07$ ¹⁵.

Per quanto concerne il parametro SR (surround ratio), il progetto dovrà soddisfare i requisiti previsti dalla norma UNI EN 13201-2 alla Tabella 1a.

Performance di riferimento

¹³ "Distanziamento degli impianti dai limiti della carreggiata e della sede stradale"

¹⁴ Si veda a tale proposito quanto previsto dalla legge regione Lombardia numero 17 /2000 e successive modificazioni

¹⁵ Si confronti con quanto riportato nell'appendice D della norma UNI 11248:2008 e al prospetto D3 della stessa norma.

Sulla base della geometria di impianto descritta al precedente paragrafo, si sono effettuate una serie di verifiche impiantistiche relative ad apparecchi a LEDs utilizzando i dati fotometrici dichiarati dai costruttori. Si osserva che per soddisfare le condizioni impiantistiche fissate, la potenza elettrica varia tra 119 W e 139 W, con un illuminamento medio compreso tra 16 e 17 lux.

I maggiori problemi si riscontrano nel raggiungimento del requisito di uniformità longitudinale o nel raggiungimento del valore di luminanza media che in taluni casi risulta inferiore di circa il 5% rispetto al limite di 1 cd/m².

Tabella 1 Risultanze illuminotecniche apparecchi LEDs sul mercato nella configurazione impiantistica selezionata

Larghezza carreggiata (m) 8
Sporgenza (m) 0.0
Disposizione unilaterale

Costruttore	Modello	Sorgente	Interdistanza (m)	Altezza (m)	Potenza (W)	Lm cd/m ²	U0	UI	TI	SR	Em (lux)	Emin (lux)	Emax (lux)	Emin/Emed	Esito
PHILIPS	KOFFER2 SGP100 P5	SAP100	29.6	8.00	114	0.95	0.41	0.77	10	0.48	15	6.79	31	0.443	NO
PHILIPS	KOFFER2 SGP100 P6	CPO CW90	29.6	8.00	99	0.95	0.39	0.7	9	0.46	15	6.46	28	0.424	NO
ARIANNA	DEF64FF060AHGS	LED	29.6	8.00	120	0.95	0.47	0.66	5	0.57	16	7.88	27	0.487	NO
AEC	L-LED-in-ST-4.7-54	LED	29.6	8.00	118	1.02	0.49	0.76	11	0.64	16	8.31	29	0.533	OK
AEC	L-ILO LED-ST-4.7-54	LED	29.6	8.00	118	1.02	0.49	0.76	11	0.64	16	8.31	29	0.533	OK
SITECO	5NA55871NT7C236 SQ 100	HST-MF 100W/220 LL	29.6	8.00	114	0.95	0.54	0.66	8	0.49	15	5.32	25	0.351	NO
SITECO	5NA55871NT7C236 SQ 100	HST-MF 100W/220 LL	29.6	8.00	114	0.98	0.5	0.68	9	0.49	15	7.09	22	0.484	NO
SITECO	10 MIDI (5XA5821A1 C08 SL)	LED	29.6	8.00	113	1.05	0.61	0.74	8	0.5	17	7.01	25	0.414	OK
SITECO	5NA55871NT7C236 SQ 100	HST-MF 100W/220 LL	29.6	8.00	114	0.95	0.5	0.66	10	0.47	15	4.97	27	0.321	NO
RUUD LIGHTING	LXDT5B706D** Ledway Road TSB 60 LEDS	LEDS	29.6	8.00	139	1.13	0.51	0.70	10	0.54	17	9.23	26	0.535	OK
RUUD LIGHTING	LXDT5706D** Ledway Road TS 60Led	LEDS	29.6	8.00	139	0.96	0.56	0.66	11	0.81	14	8.15	24	0.571	NO
GRECHI	ESTREMA72 72 LED S ESTREMA72 72 LED	LEDS	29.6	8.00	139	0.98	0.61	0.65	6	0.57	16	9.53	23	0.597	NO

Il progetto del sistema ottico dovrà produrre prestazioni simili a quelle descritte nella

Tabella 1, con particolare attenzione alla potenza elettrica impegnata.

Vincoli di progetto

I vincoli di progetto del sistema ottico, possono essere così schematizzati:

- I requisiti impiantistici devono essere soddisfatti con l'impiego di una potenza massima di 100 W escluse le perdite del sistema di alimentazione: questo vincolo discende dal fatto che apparecchi con lampade al sodio alta pressione da 100 W soddisfano i requisiti della classe ME3a per la geometria di impianto considerata
- L'efficienza del sistema ottico, escludendo il sistema di alimentazione, dovrà essere maggiore di 85 lm/W
- L'apparecchio dovrà essere dotato di vetro piano, per il soddisfacimento dei requisiti imposti dalle leggi regionali in tema di risparmio energetico e di limitazione dell'inquinamento luminoso. Il vetro di protezione si rende necessario dal momento che l'apparecchio sarà installato in vie a traffico veicolare, dove il problema l'effetto delle polveri sollevate dalla automobili e degli aggressivi chimici è di grande rilevanza per il mantenimento del flusso luminoso nel tempo (un intervento di

manutenzione di pulizia delle superfici di emissione della luce risulta difficoltoso in assenza di un vetro piano). Il grado di protezione garantito dal progetto contro l'ingresso delle polveri e dei liquidi nel vano ottico deve essere IP65.

- Coefficiente di manutenzione in funzione della vita utile del prodotto: la vita utile del prodotto dipende da numerosi fattori, limitandosi tuttavia al sistema ottico, si potrebbe il decadimento del flusso luminoso del 20% rispetto al valore iniziale determini il raggiungimento del fine vita della componente ottica. Questa assunzione rende l'apparecchio immediatamente confrontabile con soluzioni tradizionali (intervento di manutenzione di pulizia ogni 4 anni e IP 6x per il vano ottico dell'apparecchio). Occorre infatti tenere conto che decadimento del flusso luminoso per effetto della deposizione di polvere e insetti sulle superfici emittenti, risulta differente per un apparecchio a LED rispetto a una sorgente tradizionale. Alcuni costruttori propongono un valore del LMF, in funzione degli intervalli di pulizia, basati sui dati riportati alla Figura 52.

Cleaning interval (years)	1,0			2,0			3,0			4,0		
Air pollution	G	M	H	G	M	H	G	M	H	G	M	H
Protection rating of lamp space												
IP 5X	0,99	0,96	0,96	0,97	0,92	0,91	0,95	0,88	0,82	0,94	0,85	0,75
IP 6X	1,00	0,98	0,98	0,98	0,95	0,95	0,97	0,93	0,90	0,96	0,92	0,86

Table to verify the LMF for Siteco LED luminaires (01.07.2010)

Figura 52 Valore del LMF in funzione dell'intervallo di pulizia e del grado di protezione IP dell'apparecchio (fonte:SITECO)

I motivi per adottare dei valori ridotti sono essenzialmente tre: la riduzione del richiamo di insetti sulle superfici illuminate dell'apparecchio per la ridotta temperatura di esercizio (rispetto ad un apparecchio tradizionale) e per l'assenza di radiazioni UV e la riduzione della deposizione di polveri dovuti ai ridotti fenomeni convettivi sulle superfici ottiche causati dalla temperatura di funzionamento più bassa rispetto agli apparecchi tradizionali.

- Temperatura di giunzione e sistema di dissipazione: la temperatura di giunzione deve essere inferiore a 80°C al fine di non compromettere l'efficienza dei LEDs e non ridurne prematuramente il flusso luminoso emesso. Tale risultato dovrà essere raggiunto mediante un sistema di dissipazione che potrà fare uso di componenti (dissipatori alettati) commercialmente disponibili, oppure potrà avvalersi di un design proprietario, integrato alla struttura dell'apparecchio, che consenta di raggiungere le performance descritte (Figura 53).



Figura 53 Esempio di sistema di dissipazione integrato con l'apparecchio che sfrutta l'effetto camino (fonte:SITECO)
La seconda soluzione, sebbene più impegnativa dal punto di vista della fase di prototipazione, dovrebbe consentire migliori risultati con minore consumo di materiali e un aspetto estetico del prodotto maggiormente gradevole.

Progettazione preliminare modulo PLUS ME

Progetto Ottica con Power LED

Il progetto prevede l'impiego di 4 moduli equipaggiati con driver a bordo e sistema di dissipazione integrato dotati di 8 LEDs ciascuno per il raggiungimento dei requisiti illuminotecnici previsti dalla classe ME3a rispetto all'installazione impiantistica utilizzata per il test.

I principali obiettivi del progetto sono la realizzazione di un apparecchio modulare con un basso numero di sorgenti luminose (rispetto ad altri prodotti già presenti sul mercato) che consentisse quindi di ridurre gli ingombri e creare le condizioni per un design di prodotto originale e innovativo.



Figura 54 CREE XM-L : Power LED individuato considerato per lo sviluppo del prodotto

I LEDs impiegati sono i CREE XM-L, selezione di flusso T6 con tonalità della luce 5000 K, alimentati alla corrente di corrente di 1.2 A, per una potenza assorbita pari a 3.51 W . I parametri elettrici di funzionamento per ciascuna ciascuna sorgente del modulo sono riportati nella

Tabella 2.

Gli andamenti di flusso dell'efficienza luminosa, della caduta di tensione e potenza elettrica, per il LED considerato, al variare della corrente di alimentazione, sono riportati alla Figura 55 e Figura 56 (si osservi che gli andamenti sono stati tracciati per una $T_j=70^\circ\text{C}$).

Tabella 2 Caratteristiche LED CREE XM-L

LED CREE XM-L 5000 K T6					
Corrente (A)	LED Im	Im/W	LED V_f	LED W	$T_j(^{\circ}\text{C})$
1.2	410.5	117	2.93	3.51	70

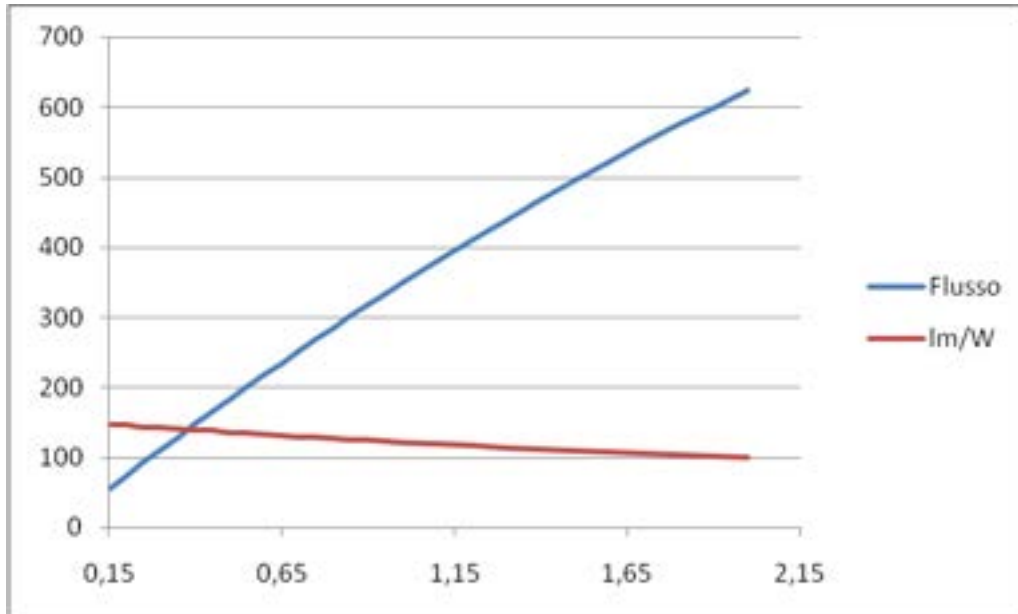


Figura 55 Andamento del flusso luminoso e dell'efficienza luminosa in funzione della corrente di alimentazione, per il LED CREE XM-L selezione T6 , alla temperatura di giunzione di 70°C

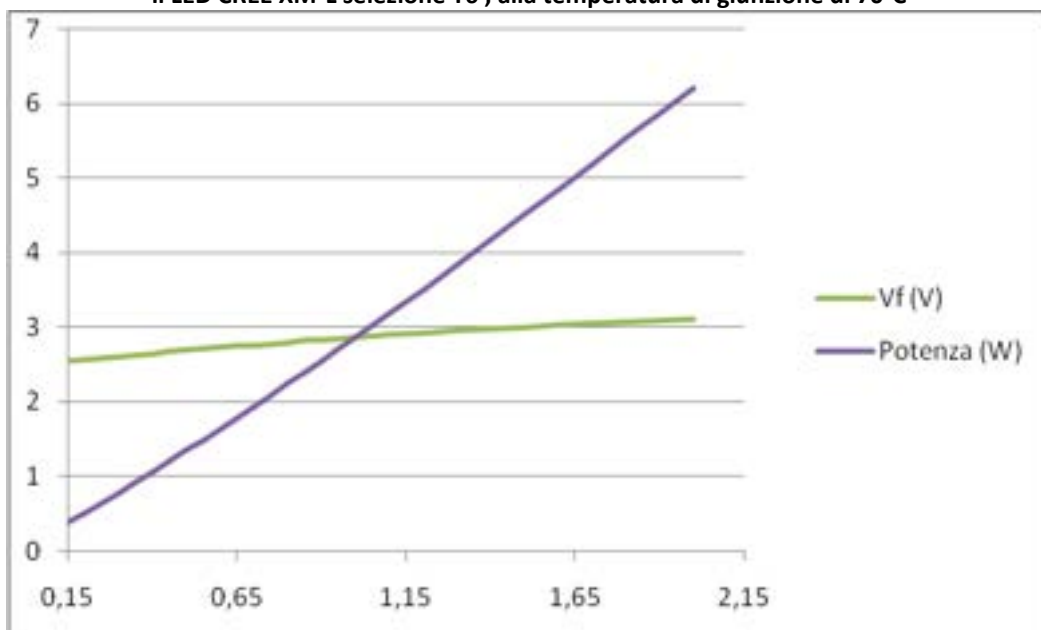


Figura 56 Andamento della tensione e della potenza elettrica in funzione della corrente di alimentazione, per il LED CREE XM-L selezione T6 , alla temperatura di giunzione di 70°C

La potenza complessiva di ciascun modulo risulta pari a 28.8 W e per una potenza totale impegnata pari a 112.32 W (escluse le perdite del sistema di alimentazione).

La selezione scelta per il progetto è la selezione in flusso T6, con flusso minimo di 280 lumen a 700 mA per $T_j=25^\circ\text{C}$, con temperatura di colore di 5000 K (regioni di binning 3A, 3B, 3C, 3D della Figura 57). A seguito di prove la selezione in flusso potrebbe scendere a T5, con un risparmio del 30% .

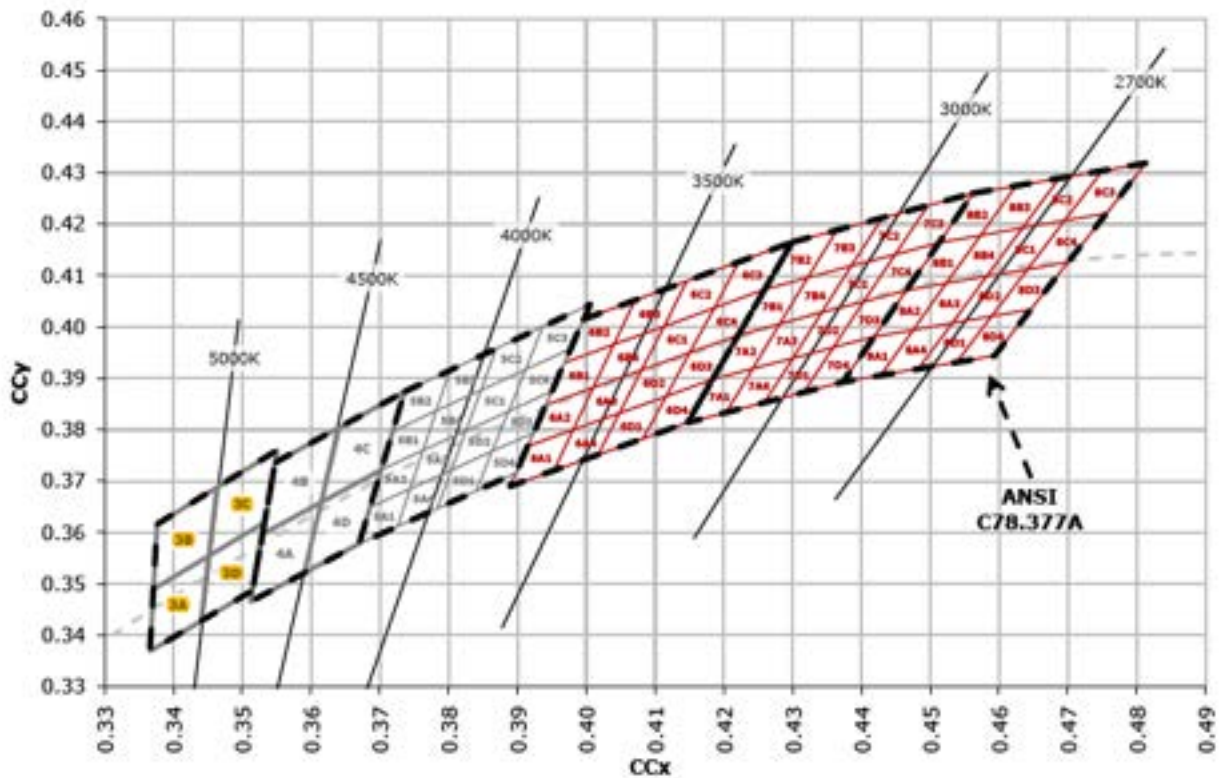


Figura 57 ANSI Natural e Warmwhite

L'order code per la selezione T6 del componente risulta XMLAWT-00-0000-000LT60E3

Risultati migliori potrebbero ottenersi impiegando LEDs più efficienti, come il nuovo prodotto di LUMILEDS LUXEON M, recentemente apparso sul mercato; il principale problema consiste nella mancanza di lenti adatte per questo componente e l'impossibilità ad oggi di avere volumi di produzione (si è nella fase di campionatura per il testing e il prodotto è disponibile al momento con la sola temperatura di colore di 5000K, solo nei prossimi mesi dovrebbe essere resa disponibile la versione a 4000K).

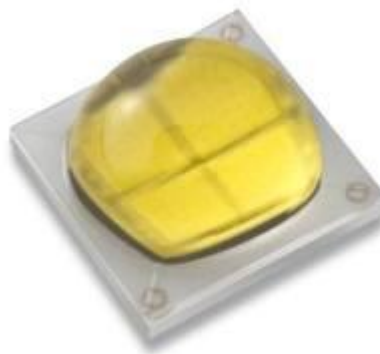


Figura 58 Luxeon M : led multichip adatto per impieghi outdoor

L'alternativa, risulta particolarmente interessante per i seguenti motivi:

- 840 lm per $T_j=85^\circ\text{C}$ @ 700 mA
- 12 V package
- CCT pari a 5700 K
- CRI pari a 70 (minimo)
- Costo inferiore del 40% circa rispetto al LED impiegato nel progetto

La riduzione delle correnti di pilotaggio ad un valore massimo di 700 mA consente l'impiego due soli driver commerciali dimmerabili e programmabili (per esempio PHILIPS Xitanium 150W .35-.7A GL Prog+ sXt) con due moduli connessi in serie, riducendo la complessità e il costo.

Le caratteristiche principali del LED driver indicato, sono riportate nella Tabella 3

Tabella 3 Caratteristiche alimentatore PHILIPS XITANIUM

Output Power (W)	Output Voltage (V)	Output Current (A)	Efficiency @ Max Load			Max Case Temp. (°C)	Input Current				Max. Input Power (W)	Inrush Current (A _{in} /30% _{in})		THD @ Max Load (%)	Power Factor @ Max Load	Surge Protection Conv/Diff (KV)	Weight (lbs/kg)	IP Rating
			120 V	230 V	277 V		1.20	2.00	1.40	1.77		120 V _{in}	35 / 140					
150	125 - 280	0.350 - 0.70	91.5	93.0	93.0	80 °C	1.4	0.85	0.7	0.6	145	230 V _{in}	108 / 140	20	70.95	4.4	1.8 / 1.27	IP66
			277 V _{in}	126 / 140														

Inoltre il raggiungimento degli obiettivi di affidabilità del sistema di alimentazione potrebbero essere raggiunti con minori costi per i test, rispetto allo sviluppo di un driver dedicato che si ridurrebbero al semplice rispetto del valore di temperatura nel T_p indicato dal costruttore del sistema di alimentazione.

Il migliore rapporto lm/W del Luxeon M, rispetto al dispositivo considerato nella fase iniziale di progetto, dovrebbe anche consentire, non appena disponibile, di ridurre la temperatura di colore verso i 5000 K, lasciando inalterato il numero di LED impiegati, il sistema di dissipazione .

Le lenti attualmente impiegate nel progetto sono in fase di sviluppo adattamento anche per il LUXEON M.

Progetto ottico del sistema¹⁶

Il progetto del sistema ottico di un apparecchio SSL inizia con la modellazione della sorgente LED o del sistema LED con lente.

Ai fini della simulazione fotometrica, la sorgente è rappresentata mediante un "ray set" ottenuto dalla distribuzione fotometrica di campo lontano derivante da misura gonio-fotometrica tradizionale, oppure attraverso il ray-set dell'uscita della lente o riflettore fornito da produttore del sistema ottico.

Il ray-set viene poi inserito all'interno di un programma di ray-tracing (TracePro 7.0.8 prodotto da Lambdares) per la simulazione della schermatura dell'emissione a $\gamma > 90^\circ$ e per valutare l'effetto della lente di protezione sulla distribuzione fotometrica della lente free-form selezionata.

Il primo passo consiste nella generazione di un ray-set a partire da una serie di dati di ingresso:

- Un file di interscambio in formato Eulumdat/lesna contenete la distribuzione delle intensità luminose di cui si vuole ottenere la corrispondente distribuzione di raggi. Il numero di piani C e angoli γ esplorati deve essere adeguato al tipo di emissione che si vuole trasformare (normalmente si utilizza un passo di 1° per gli angoli γ e 5° per i piani C) e normalmente deriva da un processo di misura di un campione
- Il numero di raggi della sorgente, tenuto conto che un numero troppo basso di raggi porterà ad una rappresentazione grossolana della distribuzione del flusso luminoso nello spazio
- Il flusso luminoso complessivamente emesso (il flusso luminoso emesso dall'apparecchio, ricavato dal file fotometrico, viene opportunamente scalato per essere uguale al flusso imposto)
- Superficie da cui partono i raggi (normalmente si tratta di semplici primitive geometriche come un piano, un disco, una sfera, un cilindro, di cui l'utente è libero di fissare le dimensioni)
- Il vettore Normale e il vettore di UP: questi due vettori, ortogonali tra loro determinano l'orientamento della fotometria rispetto alla superficie di partenza dei raggi: in particolare il vettore

¹⁶ Cfr con quanto riportato in Fulvio Musante, Danilo PALEARI, Maurizio ROSSI, " Tecniche di simulazione per la progettazione di apparecchi a LED", LUCE n 297/8 1+2 /2012, pag.. 106-117

normale individua la direzione dell'angolo γ_0 del solido fotometrico, mentre il vettore di up rappresenta la direzione con la quale allineare il piano CO del solido fotometrico.

Il programma utilizza la distribuzione fotometrica, descritta in un file ldt, per generare una matrice contenente le seguenti informazioni:

- Coordinata x di partenza del raggio sulla superficie scelta
- Coordinata y di partenza del raggio sulla superficie scelta
- Coordinata z di partenza del raggio sulla superficie scelta
- Coseno direttore rispetto asse X
- Coseno direttore rispetto asse Y
- Coseno direttore rispetto asse Z
- Valore del flusso del raggio nella direzione specificata

Le informazioni vengono di norma archiviate in un file di testo, come campi separati dal uno spazio, in cui i valori della matrice sono preceduti da un header che contiene le informazioni di riferimento dei dati contenuti nel file. Un esempio di tale file, adatto per il programma di simulazione citato, è riportato alla Figura 59.

!! Source file:

```
TracePro Release: 5 0 2
Data for Block 1 Surface 0
Linear Units in mm
Data generated at 01/03/2011 12:24:19
X Pos.          Y Pos.          Z Pos.          X Vec.          Y Vec.          Z Vec.          Inc Flux
5.013603E-002   0.000000E+000   3.083213E-001   5.597941E-001   8.124743E-001   1.628376E-001   1.000000E-001
-2.970780E-001  0.000000E+000   -3.156563E-001  2.022966E-001   8.519620E-001   -4.829459E-001  1.000000E-001
3.910854E-001   0.000000E+000   -7.289735E-001  2.729625E-001   8.494523E-001   4.515776E-001   1.000000E-001
-6.819708E-001  0.000000E+000   3.135568E-001   3.058336E-001   7.468802E-001   -5.904539E-001  1.000000E-001
```

Figura 59 Header del file di generazione dei raggi

I valori delle coordinate x,y,z di partenza del raggio sono ottenuti scegliendo uniformemente un numero di punti della superficie (corrispondenti a coppie di parametri u,v nel dominio della superficie) pari al numero di raggi da tracciare.

Il valore da attribuire al flusso luminoso di ciascun raggio, può essere determinato in due modi differenti:

- Flusso uniforme, cioè tutti i raggi avranno il medesimo valore del flusso e ciò che varia sarà soltanto il numero di raggi tracciati per ciascuna direzione, in rapporto al valore del flusso luminoso racchiuso all'interno di un angolo solido Ω (definito da un intervallo ΔC e $\Delta \gamma$). Il meccanismo funziona bene se il numero di raggi da tracciare è sufficientemente elevato, in caso contrario si introduce una certa approssimazione nelle zone del solido fotometrico dove c'è poco flusso luminoso emesso (in prossimità del cut-off della distribuzione fotometrica).

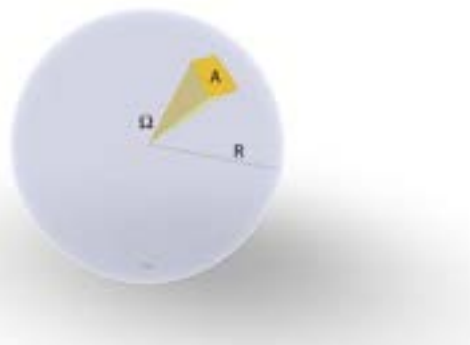


Figura 60 Schema per la generazione dei raggi a partire dalla distribuzione dei flussi luminosi nello spazio: in giallo è rappresentato un angolo solido elementare che raccoglie una certa quantità di flusso luminoso a cui occorre fare corrispondere una certa distribuzione di raggi.

- Angolo costante, cioè ciascun raggio avrà un valore differente di flusso, in modo tale che la distribuzione dei raggi risulterà pesata rispetto al flusso .

Alla distribuzione di raggi così ottenuta potranno essere applicate delle trasformazioni di traslazione (al punto di applicazione dei raggi) e le rotazioni attorno ai 3 assi coordinati, in modo da rendere coerente l'emissione ottenuta durante la fase di generazione con l'applicazione allo studio dell'ottica (di solito conviene generare i raggi con la superficie di emissione centrata nell'origine e in modo tale che il vettore normale e di UP coincidano con gli assi coordinati e di applicare successivamente le trasformazioni di traslazione e di rotazione).

Il meccanismo di generazione dei raggi non consente di stabilire il loro punto di origine a partire dalle informazioni contenute nel file fotometrico; occorre quindi che l'utente specifichi la superficie su cui disporre i raggi generati.

La Figura 61, riassume le diverse possibilità che il programma ProSource di Radiant imaging offre per la disposizione dei raggi generati dalle misure di campo vicino delle sorgenti luminose.

Undefined	
Description	The ray originates from a plane that intersects the origin and is normal to the ray.
Usage Notes	This method generates ray sets with origination points furthest from the active area of the source.
Restrictions	Do not use this method if optical surfaces in your design are positioned closer than the surface of revolution of the light source.
Parameters	None.
On a Plane	
Description	The ray originates from the point where it intersects the designated plane.
Usage Notes	Best method for optical designs that place elements along the axis normal to the plan, close to the origin (e.g. use On a Plane at Z=0 for lens optics along the Z-axis).
Restrictions	This method should be used for directional source that are measured with the light emitted roughly normal to the plane.
Parameters	<ul style="list-style-type: none"> • On a Plane at Z=0

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Rays will originate from a plane at $Z=0$, best for optical designs that have lens optics along the Z-axis • On a Plane at $X=0$ ○ Rays will originate from a plane at $X=0$, best for optical designs that have lens optics along the X-axis • On a Plane at $Y=0$ ○ Rays will originate from a plane at $Y=0$, best for optical designs that have lens optics along the Y-axis
--	---

Closest to an Axis	
Description	The ray originates from the point where it intersects or is closest to an axis.
Usage Notes	Good method for optical designs that have a parabolic reflector along the axis.
Restrictions	Do not use this method with collimated light sources that produce rays parallel to the axis.
Parameters	<ul style="list-style-type: none"> • Closest to the Z-Axis <ul style="list-style-type: none"> ○ Rays will originate closest to the Z-Axis, good for parabolic reflectors along the Z-Axis • Closest to the X-Axis <ul style="list-style-type: none"> ○ Rays will originate closest to the X-Axis, good for parabolic reflectors along the X-Axis • Closest to the Y-Axis <ul style="list-style-type: none"> ○ Rays will originate closest to the Y-Axis, good for parabolic reflectors along the Y-Axis

On or Greater than a Cylinder	
Description	The ray originates from the point it intersects with a cylinder of infinite length (unless End Caps are specified) and a radius specified by the user. If the ray does not intersect this cylinder, then the point closest to the axis is selected.
Usage Notes	Use this method to locate ray origination points between the lamp filament (or lamp structure) and optical components. This method is useful for optical designs that model the interaction between rays and the lamp structure, thus making it necessary to originate all the rays on a surface outside the lamp structure.
Restrictions	None
Parameters	<ul style="list-style-type: none"> • Z-Axis Cylinder <ul style="list-style-type: none"> ○ Rays will originate on or greater than a Z-Axis cylinder • X-Axis Cylinder <ul style="list-style-type: none"> ○ Rays will originate on or greater than a X-Axis cylinder • Y-Axis Cylinder

- Rays will originate on or greater than a Y-Axis cylinder
- Radius
 - The radius of the cylinder
- Use Cylindrical End Caps, Lower Limit, Upper Limit
 - Rays that originate beyond the specified Lower or Upper Limits will be moved back along their ray vectors to the Lower or UpperLimit plane.
- Set Ray Intensities to Zero for Rays Outside of Cylinder
 - For rays that lie outside of the cylinder, the intensities will be set to zero.

On or Greater than a Sphere

Description	The ray originates from the point where it intersects a sphere centered on the origin with a user specified radius. If the ray does not intersect this sphere, then the point closest to the origin is selected.
Usage Notes	Use this method to locate ray origination points between the lamp filament (or lamp structure) and optical components. This method is useful for optical designs that model the interaction between rays and the lamp structure thus making it necessary to originate all the rays on a surface outside the lamp structure.
Restrictions	None
Parameters	<ul style="list-style-type: none"> • Radius <ul style="list-style-type: none"> ○ The radius of the sphere • Set Ray Intensities to Zero for Rays Outside of Sphere <ul style="list-style-type: none"> ○ For rays that lie outside of the sphere, the intensities will be set to zero.

On or Greater than a Box

Description	The ray originates from the point where it intersects a box of user specified dimensions. If the ray does not intersect this box, then the point closest to the center of the box is selected.
Usage Notes	Use this method to locate ray origination points between the lamp filament (or lamp structure) and optical components. This method is useful for optical designs that model the interaction between rays and the lamp structure thus making it necessary to originate all the rays on a surface outside the lamp structure.
Restrictions	None

Parameters

- Lower Limit, Upper Limit along each axis
 - The physical limits of the box being defined; an upper and lower limit are defined separately for each axis (x, y, z)
- Set Ray Intensities to Zero for Rays Outside of Box
 - For rays that lie outside of the box, the intensities will be set to zero.

Figura 61 Origine dei raggi nel programma PROSOURCE di Radiant Imaging

Ombreggiatura delle lenti¹⁷

La distribuzione fotometrica fornita dai produttori delle lenti è generalmente riferita a un sistema LED + lente simulato o misurato, ma privo di qualsiasi ostruzione derivante dalla presenza di altri dispositivi ottici o dalla struttura stessa dell'apparecchio di illuminazione.

La tecnica precedente può essere agevolmente utilizzata per la stima dell'ombreggiamento reciproco tra le varie parti del sistema ottico in modo da poter valutare come la distribuzione fotometrica si modifica a causa delle ombreggiature.

Anche l'effetto dello schermo di protezione frontale dell'apparecchio, può essere simulato in maniera soddisfacente mediante ray tracing.

In quest'ultimo caso, occorre sottolineare che l'effetto di un vetro piano, non è soltanto quello di ridurre la quantità complessiva di flusso emesso, ma anche quella di modificarne la distribuzione fotometrica.

In alcuni casi i costruttori delle lenti forniscono dei dati relativi alla quantità di flusso intercettato dalle lenti adiacenti quanto queste sono poste molto vicine le une alle altre; la Tabella 4 mostra, ad esempio i valori forniti da LEDIL per le sue lenti strada DW e DN nella versione "square", adatte per LED della famiglia CREE XP¹⁸. L'ipotesi fatta dal costruttore è che vi sia una lente centrale illuminata posta all'interno di una matrice 3x3 di altre lenti, di diverso tipo, che intercettano il flusso luminoso emesso dall'elemento illuminato. La disposizione delle lenti, nel caso la lente illuminante sia di tipo DW e quelle schermanti di tipo DN, è riportata alla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Tabella 4 Ombreggiatura reciproca per le lenti LEDIL Strada DW e DN square per LED CREE della famiglia XP (fonte: LEDIL).

illuminated lens	shading lenses	light affected
Strada-SQ-T-DN	Strada-SQ-T-DN	1.1 %
Strada-SQ-T-DW	Strada-SQ-T-DN	3.0 %
Strada-SQ-T-DN	Strada-SQ-T-DW	1.6 %
Strada-SQ-T-DW	Strada-SQ-T-DW	6.2 %

¹⁷ Cfr con quanto riportato in Fulvio Musante, Danilo PALEARI, Maurizio ROSSI, " Tecniche di simulazione per la progettazione di apparecchi a LED", LUCE n 297/8 1+2 /2012, pag.. 106-117

¹⁸ Questa tipologia di lente è già stata utilizzata nel corso del precedente progetto PLUS



Figura 62 Esempio di disposizione utilizzata per la valutazione dell'ombreggiatura reciproca tra le lenti: in colore rosso è rappresentata una lente DW, in colore grigio le lenti DN.

Le informazioni della Tabella 4 possono essere utilizzate per la definizione della superficie emittente e il posizionamento del ray-set, generato come spiegato in precedenza, rispetto alla geometria della lente. La conoscenza di queste informazioni, rende possibile stimare in modo sufficientemente accurato l'effetto dell'ombreggiatura per configurazioni di lenti qualsiasi, che dipendono dalla distribuzione fotometrica che si desidera realizzare.

Si osserva che l'efficienza complessiva del sistema ottico dipende da tre fattori:

- Efficienza luminosa del LED impiegato, funzione della corrente di alimentazione e del regime termico a cui viene fatto lavorare.
- Efficienza delle lenti, che può variare da LED a LED.
- Ombreggiatura delle lenti.

A dimostrazione di questo si riportano i dati relativi alle lenti LEDIL DW e DN adatte per i LED CREE XM-L; dall'esame della tabella si evidenzia che gli ombreggiamenti reciproci sono molto più elevati rispetto a quelli della medesima disposizione realizzata con LED CREE XP-G.

Tabella 5 Ombreggiatura reciproca per le lenti LEDIL Strada DW e DN square per LED CREE XM-L(fonte: LEDIL).

illuminated lens	shading lenses	light affected
Strada-SQ-T-DN	Strada-SQ-T-DN	1.5 %
Strada-SQ-T-DW-EU	Strada-SQ-T-DN	3.2 %
Strada-SQ-T-DW-US	Strada-SQ-T-DN	4.8 %
Strada-SQ-T-DN	Strada-SQ-T-DW-EU	5.7 %
Strada-SQ-T-DW-EU	Strada-SQ-T-DW-EU	19.0 %
Strada-SQ-T-DW-US	Strada-SQ-T-DW-EU	26.0 %
Strada-SQ-T-DN	Strada-SQ-T-DW-US	4.4 %
Strada-SQ-T-DW-EU	Strada-SQ-T-DW-US	13.1 %
Strada-SQ-T-DW-US	Strada-SQ-T-DW-US	18.6 %

Anche il rendimento della lente, inteso come rapporto tra flusso luminoso uscente dal sistema ottico e flusso luminoso emesso dal LED, può variare notevolmente a seconda delle dimensioni del cristallo del LED. Infine, ma non meno importante, la tecnica di ray tracing può essere utilizzata per stimare la schermatura del sistema ottico al fine di garantire il rispetto dei vincoli imposti dalle leggi regionali sull'inquinamento luminoso (0.49 cd/klm per angoli $\gamma \geq 90^\circ$).

La principale difficoltà nel realizzare la schermatura risiede nel fatto che occorre eliminare l'emissione in prossimità di $\gamma=90^\circ$, senza penalizzare troppo il flusso emesso dall'apparecchio e soprattutto le intensità luminose che incidono in modo radente alla pavimentazione e che contribuiscono ad elevare il valore di luminanza media della carreggiata.

Al fine di velocizzare la procedura di simulazione è stato sviluppato uno script per TracePro, che svolge le seguenti funzioni:

- A partire dalla distribuzione fotometrica di ciascuna lente (file *.ies o *.ldt) è stato generato il corrispondente ray-set, con la procedura descritta in precedenza: occorre assicurarsi che al termine della procedura l'emissione di campo lontano del sistema il più possibile simile a quella del sistema di lenti da simulare. Queste informazioni sono state aggiornate più volte nel corso del progetto, dal momento che inizialmente si disponeva solo di geometrie approssimative delle lenti e fotometrie simulate perché il prodotto prescelto era in fase di ingegnerizzazione.
- Inserimento delle 8 sorgenti luminose (2 diverse tipologie) nelle otto posizioni geometriche previste dal progetto: le dimensioni della superficie su cui i raggi sono posti e la posizione del piano di emissione rispetto all'altezza della lente sono state determinate sperimentalmente, confrontando le fotometrie ottenute con quella di riferimento fornita dal fabbricante delle lenti, rispetto all'impianto di test.
- La geometria del dispositivo da simulare, tenuto conto delle possibili varianti, come si vedrà più avanti, viene composta sulla base delle informazioni presenti nello script che caricherà nel programma di simulazione gli elementi geometrici necessari (coppa, base, lenti, PCB) secondo le indicazioni fornite dall'utente.
- Assegnazione delle proprietà alle superfici e ai materiali del progetto: in particolare, sono stati modellati come perfettamente assorbenti i bordi schermanti del dissipatore e come riflettenti in maniera diffusa (50%) la superficie del PCB. Allo schermo di chiusura sono state assegnate le proprietà ottiche del plexiglass.
- Le sorgenti luminose vengono tracciate una per volta, e alla geometria della lente emittente viene assegnata la proprietà di perfetta trasparenza, mentre alle altre lenti viene imposto di essere perfettamente assorbenti: in questo modo è possibile valutare l'effetto di schermatura di ciascuna lente con quelle adiacenti.
- I raggi prodotti da ciascuna sorgente sono collezionati su una sfera (assunta perfettamente assorbente) di raggio 25m che circonda la geometria dell'apparecchio: a partire da essi viene generato un file *.ies che rappresenta l'emissione del sistema in prova.

Sistema Ottico (studio preliminare)

Il sistema ottico proposto prevede l'impiego di 4 lenti LEDIL Strada SQ-T-DN-XM-L e 4 lenti LEDIL Strada SQ-T-DW-XM-L, attualmente disponibili sul mercato per il LED individuato (Figura 63). Le lenti impiegate dovrebbero garantire una efficienza di oltre il 90%; inoltre la disponibilità di diverse distribuzioni fotometriche consente di combinare in modo opportuno diverse lenti ottenendo fotometrie adatte a diverse condizioni di impiego.

Il modulo in fase di progetto è dotato di schermo piano di chiusura per impedire il degrado delle performance luminose dovute all'insudiciamento delle superfici delle lenti per effetto dei fumi e del pulviscolo in massima parte prodotto dal traffico veicolare.

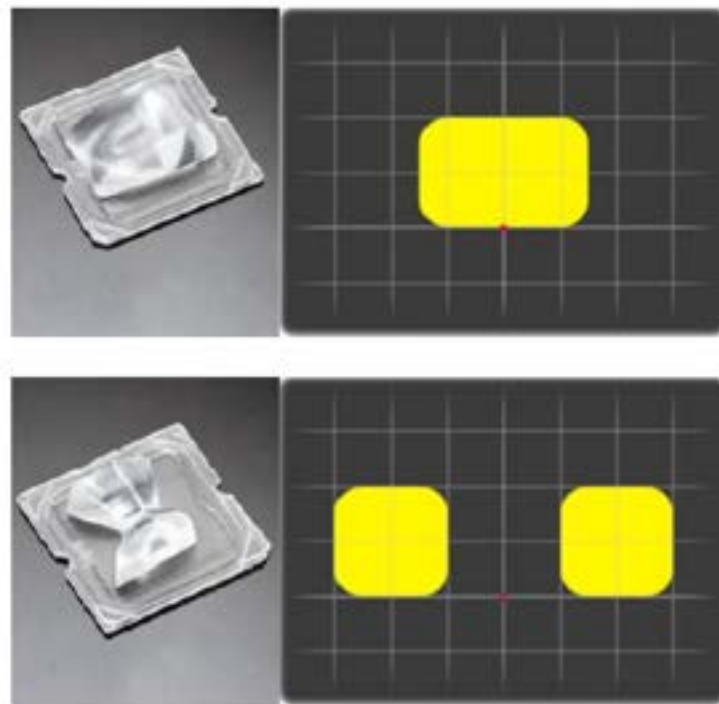


Figura 63 Distribuzione sulla carreggiata prodotta dalle due tipologie di lenti selezionate
La combinazione dell'emissione delle due lenti dà luogo alla distribuzione riportata in Figura 64.



Figura 64 Distribuzione sulla carreggiata dovuta all'impiego di una lente DW e di una lente DN
La distribuzione fotometrica, ottenuta dalla combinazione delle due lenti indicate è riportata alla Figura 65: occorre osservare che il valore delle intensità luminose per angoli γ compresi tra 75° e 90° risulta ancora molto elevato: questo dipende dal fatto che il costruttore fornisce i dati fotometrici misurando ne l'emissione con il solo PCB. Il cut-off della distribuzione è demandato all'utilizzatore il quale dovrà provvedere a schermare opportunamente l'emissione luminosa in modo da rispettare i limiti di abbagliamento (parametro TI%) e quelli relativi all'inquinamento luminoso che prevedono un'emissione inferiore a 0.50 cd/klm per angoli γ superiori o uguali a 90° , rispetto alle verticale.

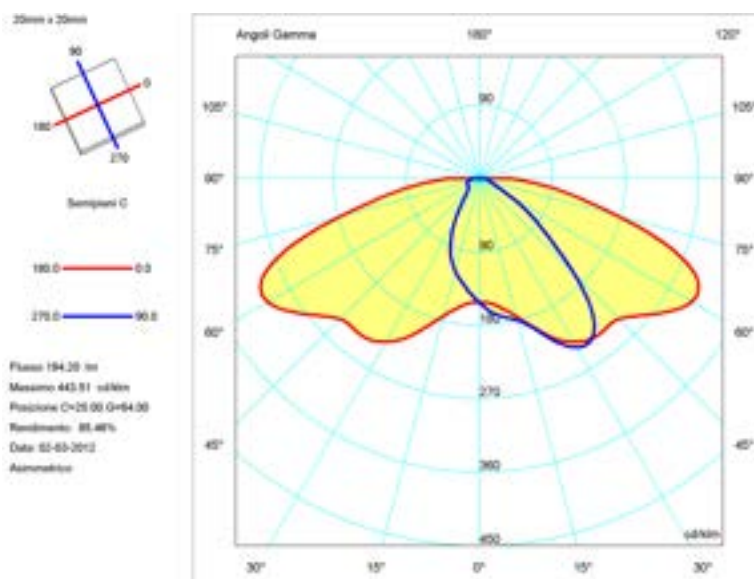


Figura 65 Distribuzione fotometrica ottenuta dalla combinazione di lenti DW e DN

Si è proceduto a un dimensionamento di massima del modulo cercando di stabilire le dimensioni minime che consentissero di raggiungere la desiderata dissipazione termica dei LEDs (si è fissato $T_j=70^{\circ}C$) e la necessaria schermatura delle sorgenti per soddisfare i vincoli posti dalle leggi regionali sull'inquinamento luminoso e per limitare l'abbagliamento debilitante.

Le dimensioni del modulo sono influenzate anche dall'ombreggiatura reciproca delle lenti che si genera quando sono avvicinate le une alle altre per costituire il modulo dell'apparecchio di illuminazione.

Il dimensionamento ha considerato i dati fotometrici messi a disposizione dal costruttore delle lenti, che sono stati assunti come base per la generazione di un ray-set da 500 K raggi per lente.

La disposizione delle lenti, ha tenuto in considerazione questo parametro, le 8 ottiche sono state separate in gruppi da 4, la cui composizione è riportata alla Figura 66; la distribuzione fotometrica ottenuta da simulazione è quella riportata alla Figura 67.

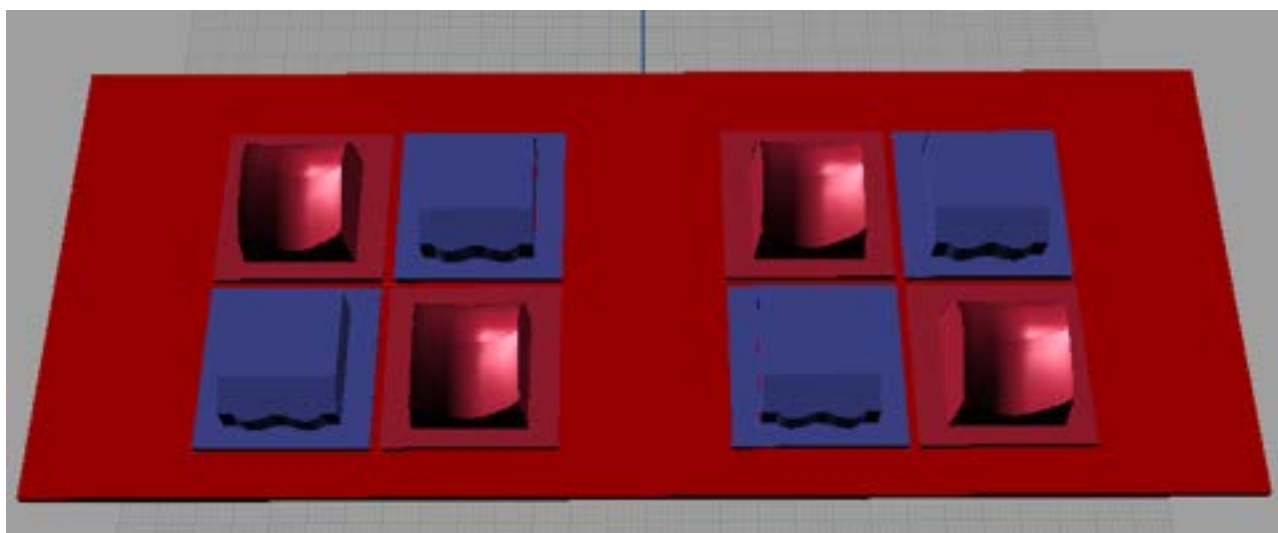


Figura 66 Disposizione delle lenti all'interno del modulo

La nuova distribuzione fotometrica differisce dalla precedente perché tiene conto della schermatura e dell'ombreggiatura reciproca tra le lenti e dell'effetto di uno schermo piano di chiusura, indispensabile per un'applicazione del prodotto in strade a traffico motorizzato. Il valore di rendimento stimato è di circa il 70% considerando un'efficienza ottica delle lenti nell'ordine del 93-94%.

Il flusso luminoso risultante dalla combinazione di 4 moduli identici risulta pari a 12333 lm, sufficienti a raggiungere i requisiti impiantisti previsti per la classe ME3a con la geometria di impianto adottata come riferimento.

Si osserva che la simulazione ottica del dispositivo è stata fatta in condizioni conservative, con una ridotta interdistanza tra i due gruppi di lenti (approssimativamente ridotta di 3 cm): l'aumento di dimensione si è reso necessario per il raggiungimento del valore prefissato di temperatura di giunzione di 70°C¹⁹.

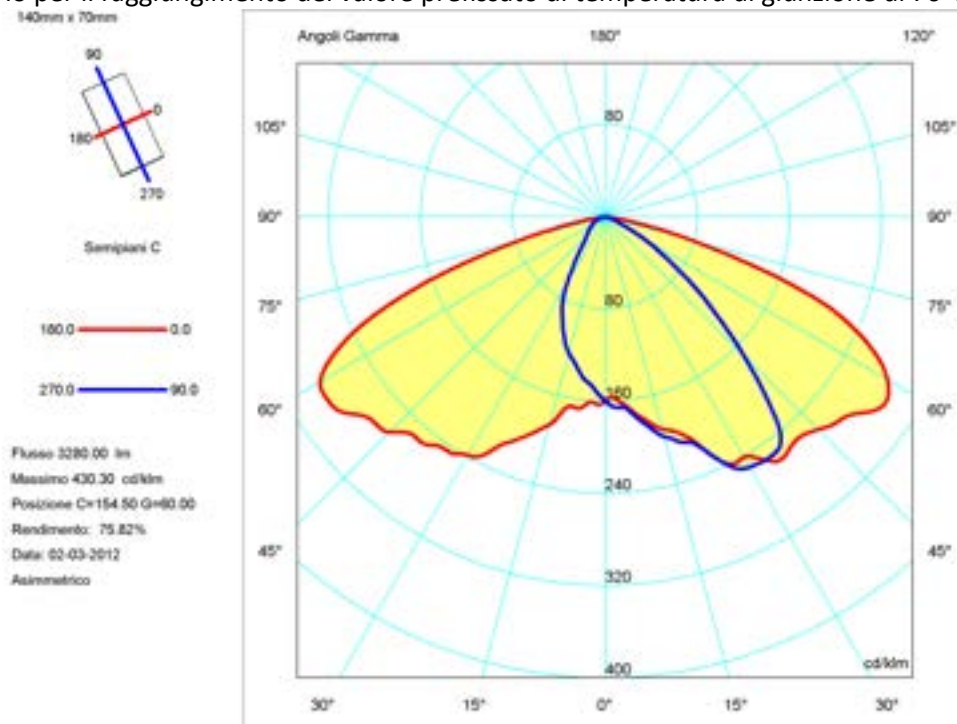


Figura 67 Distribuzione fotometrica del modulo PLUS ME 8 LEDs CREE XM-L e lenti LEDIL DW e DN

Al fine di ridurre i costi di montaggio, si è pensato di utilizzare un modulo composto da 4 lenti stampate su una sola cover (2 DW e 2 DN) che dovrebbe essere commercializzato da LEDIL entro breve tempo.

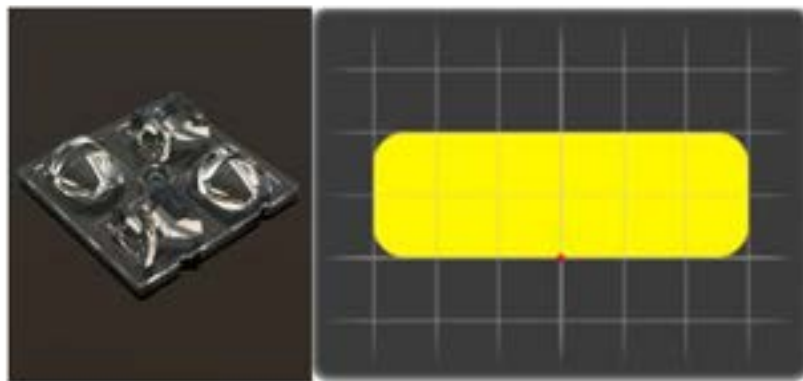


Figura 68 Cover 4 lenti (LEDIL)

Modello termico del LED

Il LED considerato presenta una resistenza termica equivalente pari a 2.5 °C/W, ciascun componente è stato modellato come un volumetto di dimensioni 5x5x0.73 mm.

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.

¹⁹ La maggiore interdistanza tra i due gruppi di lenti può essere utilmente sfruttata anche per l'adozione di una modulo che contiene 4 lenti unite

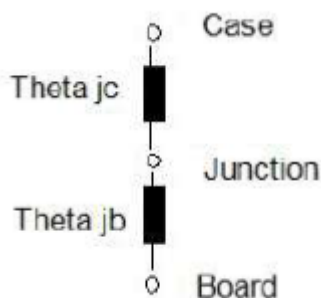


Figura 69 Modello termico del LED

Il componente **Theta jc** 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 Jb** 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; non risulta quindi corretto schematizzare a ciascun LED come una sorgente di calore a cui corrisponde una potenza pari a 3.51 W.

A tale scopo è stato predisposto un foglio excel per la valutazione della frazione di potenza elettrica che non viene convertita in luce, ma in calore; il punto di partenza è il bilancio termico, illustrato alla Figura 70 (a), per un LED di potenza a conversione di luce blu con fosforo YAG, dove si osserva che circa 80% della potenza elettrica assorbita è convertita in calore attraverso una serie di meccanismi differenti.

In prima approssimazione, si ha che ciascun LED, rappresenta una sorgente di calore pari a $0.80 \cdot 3.51W = 2.808$ W che possiamo approssima a circa 2.81 W. Questa rappresenta il caso pessimo nella stima della potenza elettrica che viene trasformata in calore.

Occorre verificare che il risultato di prima approssimazione sia corretto rispetto al dispositivo effettivamente impiegato (la frazione di potenza elettrica convertita in radiazione visibile è legata al valore di efficienza luminosa (lm/W) del dispositivo che aumenta con il crescere della CCT, mentre diminuisce con l'aumentare della temperatura di giunzione)

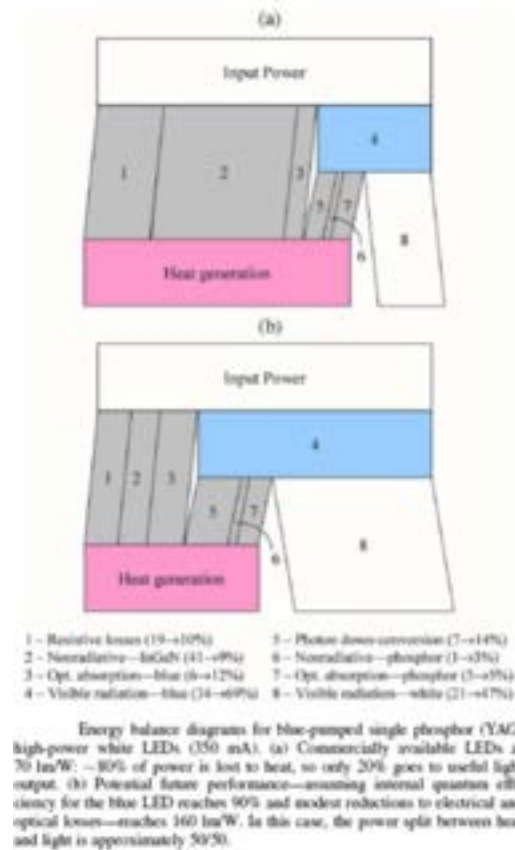


Figura 70 Bilancio energetico per un led di potenza (POWER LED) a singola conversione di luce blu (YAG Phosphor)²⁰
Per la verifica è stato determinato il flusso radiante spettrale $\Phi_e(\lambda)$ [Wnm^{-1}] del LED alimentato alla corrente di 350 mA nella banda tra 380 e 780 nm (tale grandezza radiometrica è stata ricavata a partire dallo spettro della sorgente, normalizzato tra 0 e 1 (Figura 71), che è stato opportunamente scalato in modo tale che il corrispondente valore del flusso luminoso Φ_v sia pari a 410 lm per $I_f=1200\text{mA}$ e $T_{\text{pad}}=70^\circ\text{C}$).

$$\Phi_v = 683 \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right] * \sum_{380}^{780} V(\lambda) \Phi_s(\lambda) \Delta\lambda$$

A partire dal valore del flusso radiante spettrale $\Phi_e(\lambda)$ [Wnm^{-1}] del LED è stata determinato il flusso radiante Φ_e [W] per mezzo di integrazione sulla lunghezza d'onda.

$$\Phi_e = \sum_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) \Delta\lambda$$

²⁰Michael R. Krames, Oleg B. Shchekin, Regina Mueller-Mach, Gerd O. Mueller, Ling Zhou, Gerard Harbers, and M. George Craford, "Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting", JOURNAL OF DISPLAY TECHNOLOGY, VOL. 3, NO. 2, JUNE 2007

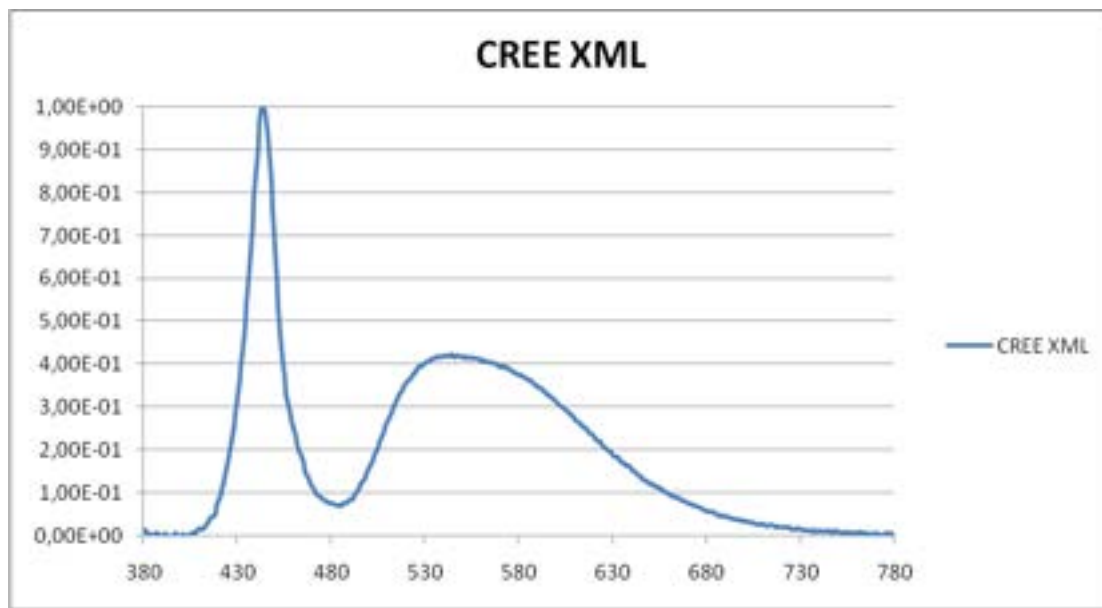


Figura 71 Spettro CREE XM-L (temperatura correlata di colore 5000 K nominale) ricavato dal data sheets

Il rapporto tra la potenza elettrica assorbita dal dispositivo, pari al prodotto della tensione per la corrente $2.93 \text{ V} \cdot 1.2 = 3.51 \text{ W}$, e il valore del flusso radiante, fornisce la percentuale di potenza elettrica che viene convertita in radiazione visibile e quindi in flusso luminoso, mentre il suo complemento all'unità rappresenta la frazione di potenza elettrica che non dà luogo a un fenomeno radiativo e che viene dissipata sotto forma di calore.

La dipendenza del risultato dalla temperatura di giunzione è stata tenuta in conto, ricavando il valore del flusso radiante spettrale, nella modalità descritta, per un valore della temperatura di giunzione pari a 70°C che rappresenta il valore di progetto.

Nel calcolo precedente, si è tenuto conto anche della riduzione della caduta di tensione ai capi del LED con l'aumentare della temperatura di giunzione.

In tali condizioni la potenza trasformata in calore da ciascun LED risulta pari a 2.220 W , che rappresenta la stima nelle reali condizioni di funzionamento del modulo.

Volume di controllo²¹

Le prestazioni termiche di molti dispositivi di raffreddamento passivo dipendono dall'interazione con l'ambiente esterno. A differenza dei dispositivi di raffreddamento attivo in cui domina l'effetto della ventola interna di raffreddamento, i dispositivi passivi sono raffreddati attraverso il movimento di aria esterna al dispositivo. Per simulare questa interazione, occorre quindi considerare una regione d'aria che avvolga completamente il dispositivo in esame.

Semplificando il problema si possono individuare tre principali modelli basati sul posizionamento del dispositivo rispetto all'ambiente circostante: **mounted**, **Air-mounted** e **Wall-mounted**.

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 72; 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)

²¹ Cfr con quanto descritto nel manuale CFDDesign 2013 user manual

- Le proprietà fisiche del volumetto d'aria contenuto all'interno del volume di controllo saranno variabili a seconda della propria temperatura

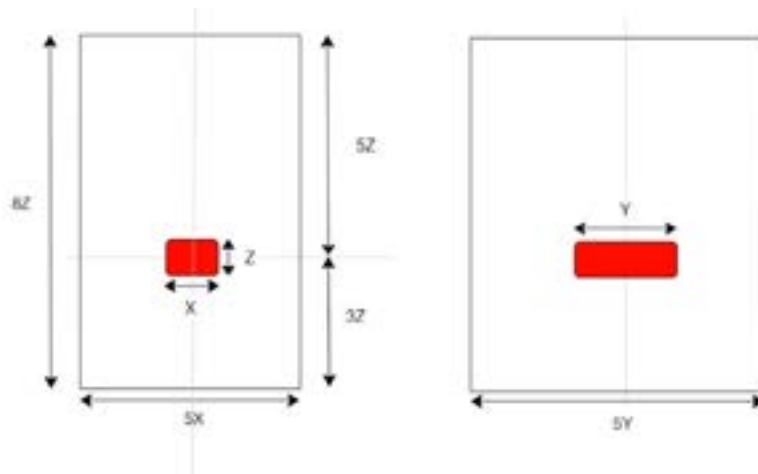


Figura 72 Dimensione del volume di controllo in rapporto alle dimensioni dell'apparecchio di illuminazione

Nelle simulazioni termiche presentate nel seguito non è stato tenuto conto dell'effetto di irraggiamento reciproco tra le diverse parti del dissipatore, principalmente a causa dell'incertezza sull'emissività dei materiali termo-conduttivi.

Modellazione del PCB

Il modello del PCB utilizzato per la simulazione termica del modulo definitivo, è riportato alla Figura 73: 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 73 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 due grandezze sono calcolate, in accordo alle seguenti relazioni:

$$k_{in-plane} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i \cdot k_i \cdot C_i^E}{\sum_{i=1}^N t_i} \qquad k_{normal} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N \frac{t_i}{k_i \cdot C_i}}$$

Dove

N: numero massimo di layers

k_i : conducibilità termica del layer i-esimo (W/mK)

t: spessore (m)

C_i : percentuale di copertura del layer i-esimo rispetto alle dimensioni del PCB

E : esponente di copertura (vale 1 o 2 a seconda del layout delle piste del PCB)

Questi valori sono determinati attraverso un foglio *.xls, che tiene conto del numero dei layers presenti, della loro conduttività termica, della percentuale di superficie occupata da ciascuno rispetto alle dimensioni del PCB.

I valori utilizzati per i calcoli sono stati presi dalla Figura 74, che si riferisce a un MCPCB generico di media qualità.

Layer	Thermal conductivity [W/mK]	Thickness [μm]
Aluminum	150	1600
Dielectric layer	2.3	100
Copper (Top)	398	50

Figura 74 Valori della conducibilità termica per un generico metal core PCB²²

Dalle formule riportate si osserva che il valore della conducibilità sul piano dipende essenzialmente dal fattore di copertura della superficie, mentre la conducibilità in senso normale dipende essenzialmente dagli spessori e dalla conducibilità termica dello strato del dielettrico.

Lo spessore e il tipo di dielettrico sono funzione dell'isolamento richiesto; la Figura 75 mostra i differenti tipi di dielettrico prodotti da BERQUIST in funzione dello spessore, della tensione di Breakdown e della conducibilità termica.

Applications

SINGLE LAYER		THERMAL PERFORMANCE			DIELECTRIC PERFORMANCE		OTHER		
Part Number	Thickness ¹ [000'/μm]	Impedance ² [°C/W]	Impedance ³ [°C in/W] / [°C cm/W]	Conductivity ⁴ [W/m-K]	Breakdown ⁵ [KVAC]	Permittivity ⁶ [Dielectric Constant]	Gas Transmitt ⁷ [°C]	U.L. Index ⁸ [°C]	Pool Strength ⁹ [tblin] / [N/mm]
HT-04503	3/76	0.45	0.05 / 0.32	2.2	6.0	7	150	140/140	6 / 1.1
HT-07006	6/152	0.70	0.11/ 0.71	2.2	11.0	7	150	140/140	6 / 1.1
MP-06503	3/76	0.65	0.09 / 0.58	1.3	8.5	6	90	130/140	9 / 1.6
MULTI-LAYER									
HT-09009	9/229	0.90	0.16 / 1.03	2.2	20.0	7	150	150/150	8 / 1.1
HT-07006	6/152	0.70	0.11/ 0.71	2.2	11.0	7	150	140/140	6 / 1.1
CML-11006*	6/152	1.10	0.21 / 1.35	1.1	10.0	7	90	130/130	10 / 1.8
HIGH POWER LIGHTING									
HPL-03015	1.5/38	0.30	0.02 / 0.13	3.0	2.5	6	185	**	5 / 0.9
Method Description	1 - Optical 2 - Internal TO-220 test RD2018	3 - Calculation from ASTM 5470 4 - Extended ASTM 5470 5 - ASTM D189	6 - ASTM D150 7 - Internal MDSC test RD 2014 8 - U.L. 746 E	9 - ASTM D2861 *CME is available in prepreg form **Pending					

Note: For applications with an expected voltage over 480 Volts AC, Bergquist recommends a dielectric thickness greater than 0.003" (76μm).
 Note: Maximum test voltage is a function of material and circuit design. Typical proof test does not represent the maximum.
 Note: Circuit design is the most important consideration for determining safety agency compliance.

Figura 75 Tipo di dielettrico e spessore in funzione dell'applicazione (isolamento e impedenza termica desiderata)²³

Di norma lo spessore dei layer di alluminio che realizza la base plate del PCB, è scelto all'interno di spessori standard, per la maggior parte delle applicazioni (Figura 76).

Di norma le leghe di alluminio utilizzate sono 5052 e la 6061, che presentano analoghe caratteristiche termiche, ma differenti proprietà meccaniche.

²² SEOUL SEMICONDUCTOR Application Note, "Thermal Management Design for Acrich2", Rev 00, March 2012

²³ BERQUIST, "Thermal Clad Selection Guide", September 2009

Aluminum - Thicknesses

Inches	Millimeters
0.020	0.51
0.032	0.81
0.040	1.02
0.062	1.57
0.080	2.03
0.125	3.18
0.160	4.06
0.190	4.83

Figura 76 Spessori commerciali per la realizzazione del Base Plate di Alluminio²⁴

Per quanto riguarda lo spessore del rame sulle piste (Figura 77), questo dipende essenzialmente dalla corrente di pilotaggio dei LED, tenuto conto che l'incremento temperatura raggiunta dal PCB per effetto del calore dissipato per effetto Joule sulle piste risulta ridotto per il MCPCB rispetto a un circuito in FR4 a causa della migliore conducibilità termica del sistema²⁵. L'aumento dello spessore del rame comporta un aumento della conducibilità termica k-normal e quindi un abbassamento della temperatura di giunzione dei LEDs.

Standard Circuit Layer Thickness

MATERIAL	WEIGHT (oz/ft ²)	REFERENCE	
		Inches	µm
Copper (Zinc Treatment)	1	0.0014	35
	2	0.0028	70
	3	0.0042	105
	4	0.0056	140
	5	0.0070	175
	6	0.0084	210
	8	0.0112	280
	10	0.0140	350

NOTE: Copper foil is NOT measured for thickness as a control method. Instead, it is certified to an area weight requirement per IPC-4562. The nominal thickness given on 1 oz. copper is 0.0014"/35 µm.

CAUTION! Values in IPC-4562 (Table 1.1) are not representative of mechanical thickness.

Figura 77 Spessore del layer di rame (valori standard per BERQUIST)

Per la simulazione termica del comportamento del MCPCB, sono possibili 3 differenti soluzioni:

1. Creare una serie di volumi, uno per ciascun layer e assegnare a ciascuno di essi le proprietà di conducibilità termica appropriate (es. sulla base dei valori riportati alla Figura 74). Questa soluzione è molto accurata, ma aumenta i tempi di calcolo, a causa della mesh dello strato dielettrico che è molto sottile.
2. Creare un volume che rappresenta il PCB nel suo complesso assegnando le proprietà termiche del materiale utilizzato per il base plate (per esempio alluminio, nella maggior parte dei casi) e rappresentare le proprietà del dielettrico e dello strato di rame tramite una superficie a cui verrà assegnata una proprietà di conducibilità termica equivalente. I risultati della predizione sono soddisfacenti.

²⁴ BERQUIST, "Thermal Clad Selection Guide", September 2009

²⁵ Questo effetto è trascurabile nella nostra applicazione, anche utilizzando lo spessore più ridotto a causa delle basse correnti in gioco (<2 A)

3. Creare un singolo volume con solo layer (dello spessore del PCB desiderato) e assegnare la proprietà termiche di un metallo (ad esempio Alluminio, che risulta predominante rispetto ad altri materiali). Non è un metodo molto accurato

Le caratteristiche termiche del PCB utilizzato per la simulazione, sono riassunte dalla Figura 78, mentre per la simulazione definitiva è stato creato un materiale 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 78 Caratteristiche termiche del metal core PCB

Dissipazione termica (studio preliminare)

Lo scopo è quello di definire un ingombro minimo del modulo per la fase iniziale di studio che tenesse conto anche degli ingombri del sistema di dissipazione.

A tale fine sono state effettuate alcune simulazioni termiche del dispositivo considerando due differenti tipi di alettatura e si è proceduto a determinare il passo e l'altezza delle alette affinché la temperatura di giunzione fosse prossima al valore di 70°C.

Per il progetto, si è considerato l'impiego di un metal core PCB dallo spessore di 1.60 mm, che occupa completamente la superficie del modulo²⁶.

La Figura 79 mostra i risultati della simulazione termica per alette parallele al lato lungo del modulo, mentre la Figura 80 mostra la stima nel caso in cui le alette siano disposte parallelamente al lato corto del modulo. La seconda soluzione appare, a parità di altezza delle alette, decisamente più efficiente.

La temperatura di giunzione media nel caso le alette siano parallele al lato corto del modulo, risulta pari a 77.5 °C, mentre nel caso le alette sono disposte parallelamente al lato lungo la temperatura di giunzione raggiunge 86.3°C. Nei calcoli si è tenuto conto di una potenza termica pari a 2.808 W per ciascun LED, mettendoci nelle condizioni più conservative.

²⁶ Le "prestazioni" termiche di questo materiale sono state volutamente sottostimate, al fine di ottenere dei risultati che siano insensibili alla particolare scelta del materiale e indipendenti dall'interfaccia termica tra il PCB e il dissipatore in alluminio.

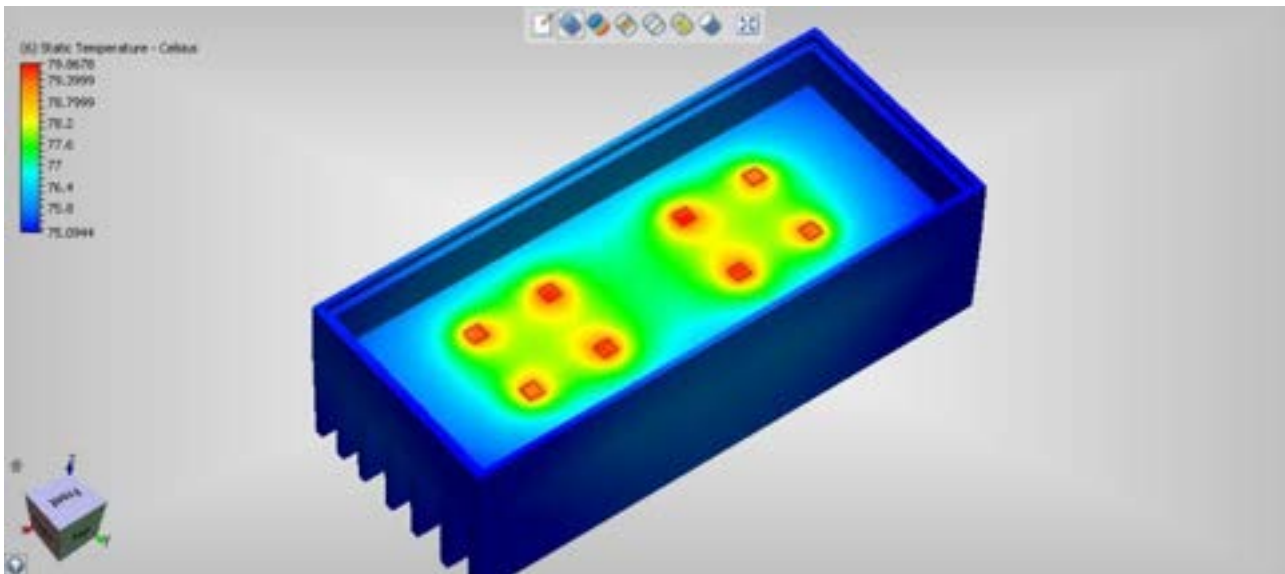


Figura 79 Soluzione con alette parallele al lato lungo del modulo

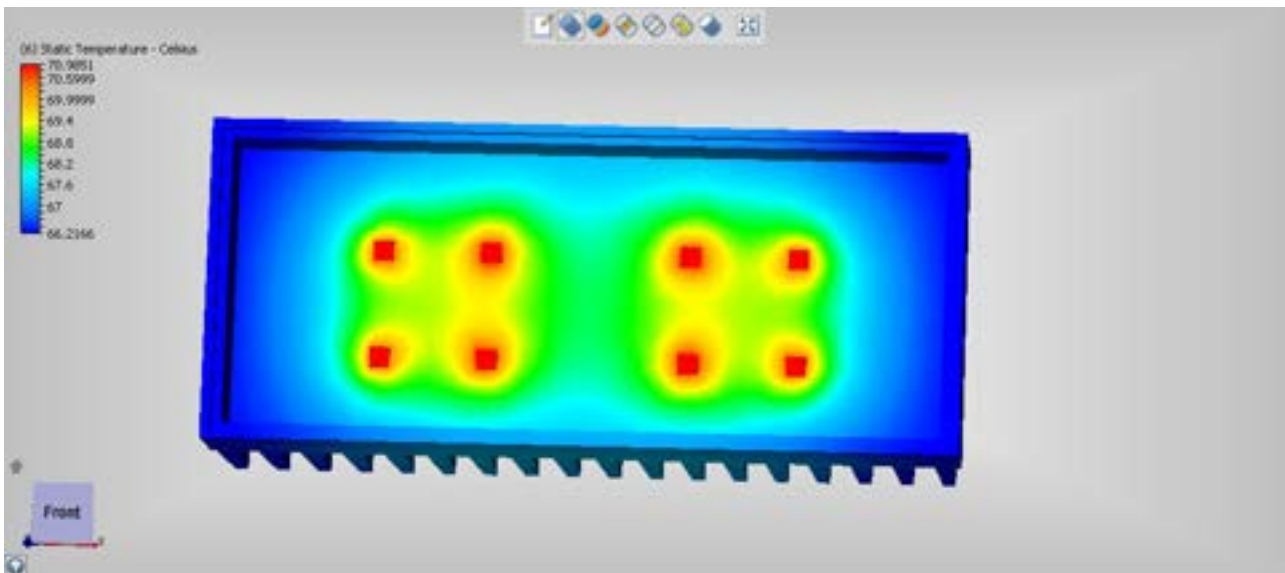


Figura 80 Soluzione con alette parallele al lato corto del modulo

Le dimensioni del modulo con alette parallele al lato corto, sono riportate alla Figura 81: si tratta di un dimensionamento di massima per la valutazione degli ingombri di ciascun modulo da utilizzarsi esclusivamente per la stima dei costi di realizzazione.

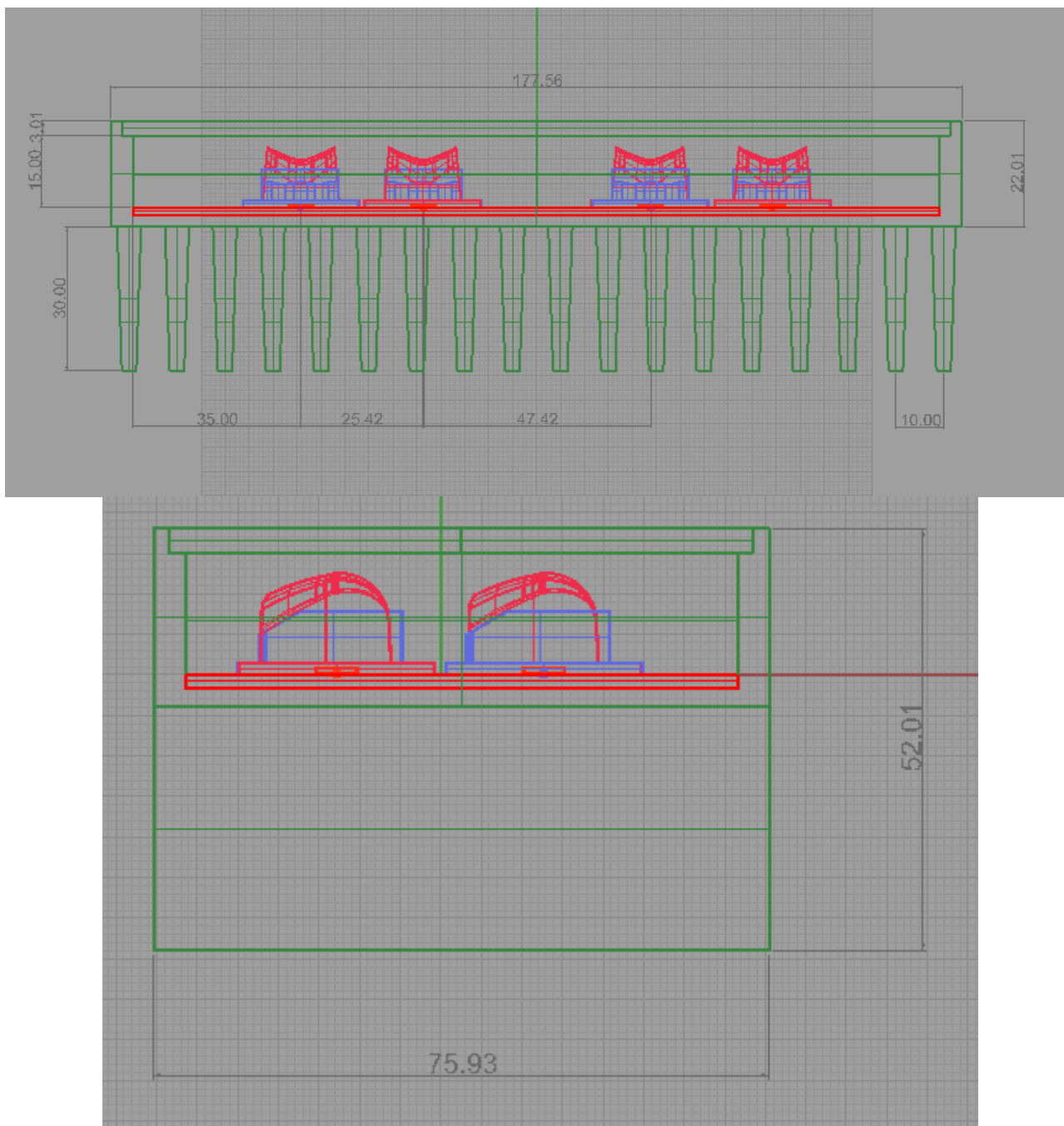


Figura 81 Dimensioni del dissipatore con alette parallele al lato corto

Sistema di alimentazione (studio preliminare)

Il sistema di alimentazione del modulo è costituito da un LED driver a bordo del modulo RECOM DC/DC converter RDC-48-1.20/M, con efficienza tipica del 96%.

Il driver accetta in ingresso una tensione compresa tra 9 e 60 V e fornisce in uscita una corrente dimmerabile tra 0 e 1200 mA, con un controllo del dimming analogico e digitale.

L'alimentatore AC/DC a costante voltage a 48 V si trova alloggiato al di fuori del modulo, nella parte di apparecchio che viene fissata al palo.



Figura82 Constant Current Buck LED Driver RDC-48 -1.20/M

Il posizionamento del driver dipenderà essenzialmente dal layout complessivo dell'apparecchio, ma in linea generale dovrà essere predisposto un PCB con la possibilità di montaggio del driver sul lato destro e sinistro del lato corto del modulo.

Concept di design

L'apparecchio di design che si intende progettare per le categorie stradali ME (con riferimento alla normativa UNI EN 13201-2: 2004) estende il concept e la visione progettuale dell'apparecchio PLUS realizzato, in una precedente ricerca, per classi stradali CE e S. Continuare con lo stesso concept di design, determina la costruzione di un family feeling ovvero di un'immagine riconoscibile di uno stesso gruppo di prodotti per l'illuminazione urbana per diverse applicazioni ma con la stessa logica di base. La visione progettuale che dà vita a questa nuova tipologia di apparecchi stradali a LED si basa su tre elementi:

- ELSE & LESS, trasformazione formale con riduzione di materiale
- OPEN SYSTEM, longevità di sistema tramite modularità
- RESPONSIBILITY, efficienza ed efficacia

Secondo questa visione, l'apparecchio per esterni classico è stato ripensato e ridisegnato in maniera completamente nuova, sia nella concezione dell'intero sistema sia nella forma che le nuove sorgenti di illuminazione LED dovrebbero avere: il sistema modulare. Il concept del modulo e del sistema modulare si allontana completamente dal concetto di apparecchio monoblocco che ospita tutti gli elementi funzionali all'illuminazione (testa luminosa e componenti elettriche) all'interno di una scocca unica posta in testa al palo. Il design del modulo e del sistema modulare prevede la distinzione in più componenti o blocchi logici funzionali del sistema di illuminazione al fine di ottenere un sistema riconfigurabile, flessibile, facilmente manutenibile e con una forma funzionale estremamente nuova rispetto alla tradizione. (Figura 83)

Il processo di scomposizione e ricomposizione funzionale prende il nome di design by components ed ha un duplice scopo: da un lato disegnare un oggetto più funzionale e più sostenibile perché composto da elementi facilmente disassemblabili e sostituibili separatamente (in base al proprio ciclo di vita, all'evoluzione tecnologica e alle necessità di manutenzione); dall'altro determina, in maniera quasi automatica, un'estetica e una forma completamente autonomi rispetto al tradizionale apparecchio di illuminazione per esterni.

L'apparecchio di illuminazione PLUS è caratterizzato da tre blocchi logici funzionali che permettono, grazie alla ricombinazione delle parti e al design di un sistema aperto, diverse configurazioni e possibili applicazioni. Il motore luminoso diventa modulo ottico - termico - meccanico ed è stato progettato e pensato al fine di poter alloggiare diverse tecnologie a LED in continua evoluzione, in modo da prolungare la vita dell'apparecchio e del design dello stesso.

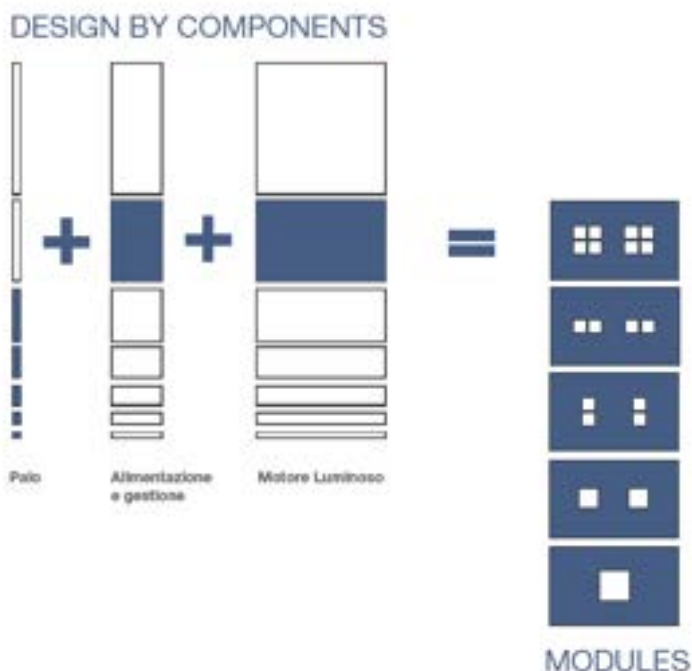


Figura 83. Design by Components sistema modulare dell'apparecchio di illuminazione

A partire da questo elemento progettuale comune alla famiglia PLUS, l'apparecchio per categorie stradali ME è stato dunque ripensato e ridisegnato in maniera formalmente nuova, sia rispetto al sistema di supporto e aggancio al palo sia nella forma del singolo modulo. Questo perché diversi sono sia il contesto d'uso del PLUS ME (strade a scorrimento veloce senza riferimenti ai valori storici dell'intorno) sia per le configurazioni ottenibili.

Il modulo è caratterizzato da una sovrapposizione di una serie di layer funzionali ed è ridotto al minimo dei componenti e degli spessori utili alla funzionalità del sistema. Il modulo sarà dunque caratterizzato e configurato come un pacchetto progettato composto da PCB, da Power LED e da una combinazione di ottiche free-form intercambiabili, per esempio di due tipi combinati, in base al raggiungimento della categoria illuminotecnica considerata.

Si tratta sostanzialmente di un blocco logico di luce perché provvisto dei LEDs e ottiche free-form a cui si aggiunga un sistema di chiusura ovvero una coppa in PMMA e il sistema di dissipazione integrato per rendere il tutto completamente integrato e funzionante sia a livello fotometrico che termico. Il sistema di alimentazione viene svincolato dal modulo e diventa elemento da vincolarsi al palo o alla forma dell'apparecchio di illuminazione completo. I layer da cui è composto il modulo sono rappresentati nello schema rappresentato in Figura 84.

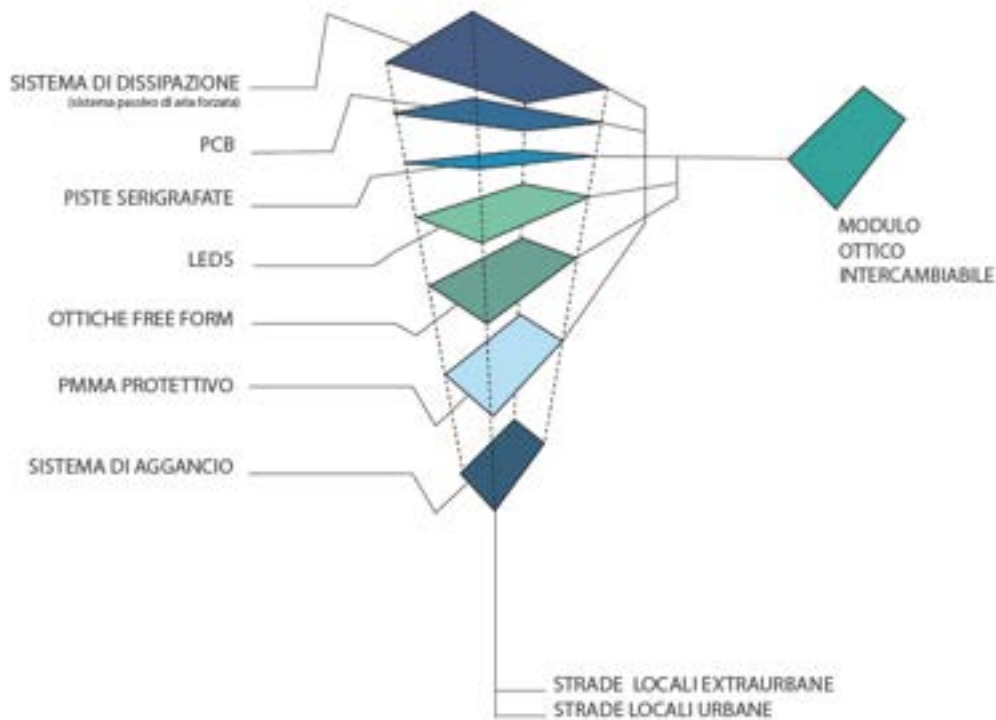


Figura 84: Layer funzionali da cui è costituito il modulo: integrazione ottica, termica e meccanica

Il modulo è stato disegnato in maniera da mantenere le minime dimensioni, i minimi ingombri e utilizzare al minimo i materiali nella semplicità di un piccolo blocco tecnico di illuminazione che presenti degli accorgimenti formali utili a creare una forma armonica nell'intero apparecchio ma anche volti a migliorare le prestazioni funzionali come la dissipazione termica. (Figura 85)

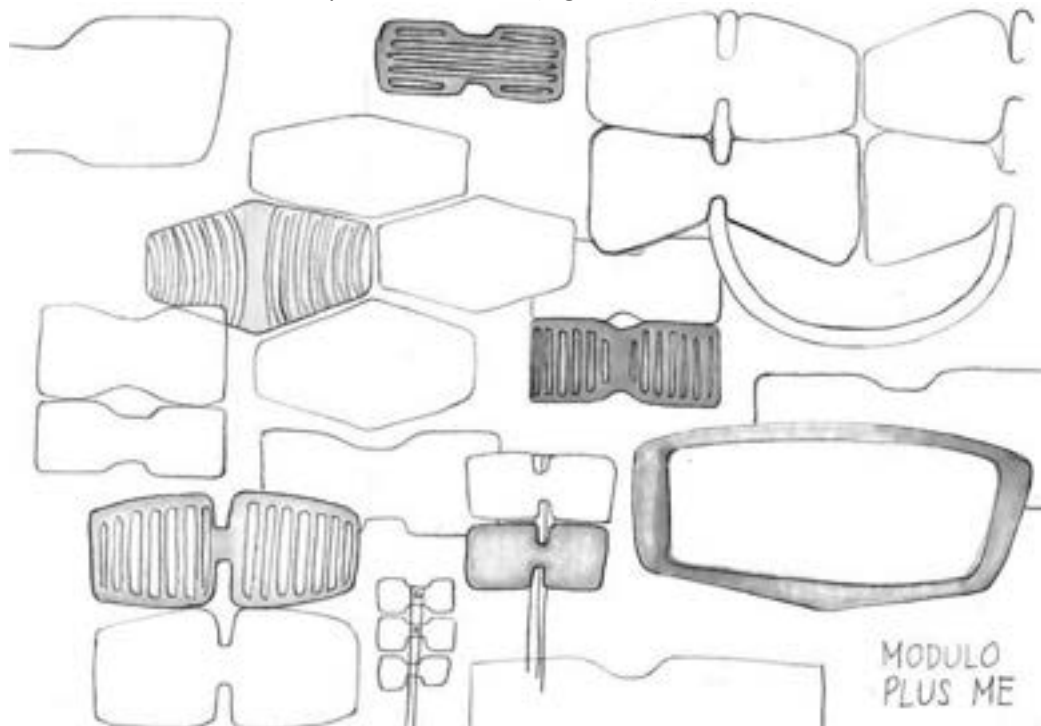


Figura 85. Schizzi preliminari per dimensionare e determinare la forma del modulo

Il design del modulo deve tenere in considerazione tre fattori che contribuiscono al funzionamento e all'efficienza del sistema: fattori ottici (con relativa disposizione delle ottiche, dimensionamento della coppa e del sistema schermante) fattori termici (con relativo dimensionamento e design del sistema di

dissipazione termica) fattori meccanici (che sono relativi al modo in cui i diversi moduli verranno connessi al palo e verrà distribuita l'alimentazione). Il design del modulo ha subito una costante verifica di tali parametri e una conseguente trasformazione delle sue caratteristiche formali fino a raggiungere una soluzione di compromesso che fosse funzionale, producibile ed esteticamente valida. (Figura 86)

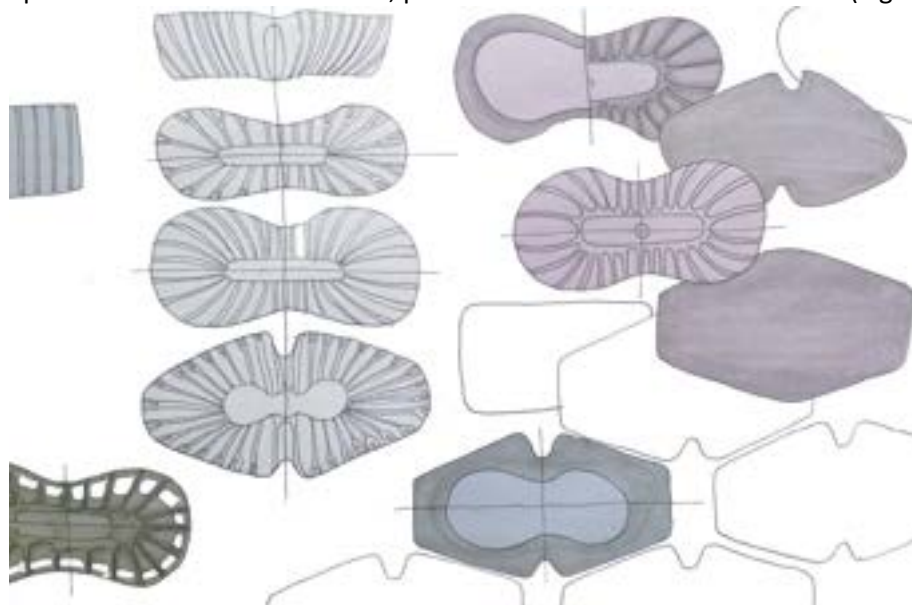


Figura 86. Evoluzione del design del modulo per la massimizzazione della funzionalità ottica e dissipazione termica

L'ispirazione formale dell'elemento tiene conto di aspetti funzionali, geometrici ed estetici. In primo luogo si è considerata la facilità di creare una ritmica modulare modulo funzionale a comporre diverse configurazioni (4, 3, 2 elementi) che si ispira al mondo naturale per quanto riguarda la forma del dissipatore cercando di rendere l'alettatura oltreché termicamente utile anche esteticamente interessante. Il modulo di dissipazione termica, infatti, dovendo garantire il corretto funzionamento del modulo e, da calcoli preliminari, avendo ingombri particolarmente importanti necessita di una particolare attenzione progettuale: l'ispirazione fitomorfa e zoomorfa dell'alettatura è derivata dalla necessità di aumentare la superficie dissipante in dimensioni contenute. Ulteriore elemento tenuto in considerazione è il colore e le finiture del modulo. Pensato come elemento decorativo che possa avere una propria estetica anche durante il giorno, il modulo è caratterizzato da colori iridescenti, pigmenti e vernici cangianti le cui tonalità possano interagire con la luce del sole creando un oggetto dinamico e mutevole. Per un maggiore approfondimento, si rimanda al moodboard di progetto presente nella presentazione relativa al progetto PLUS ME.

Il motore luminoso finale risulterà un modulo funzionale e autonomo in grado di ottenere buone prestazioni luminose e termiche. Le sue dimensioni massime sono: 260 x 130 e uno spessore di 52 mm. (Figura 87). Il modulo è caratterizzato da una forma compatta e pochi componenti: la parte inferiore ospita il sistema ottico costituito dai LED e dalle ottiche free-form, da una lente protettiva e di chiusura della parte elettrica. La parte superiore, diversamente, è funzionale alla dissipazione termica e all'aggancio del modulo al sistema dell'apparecchio.

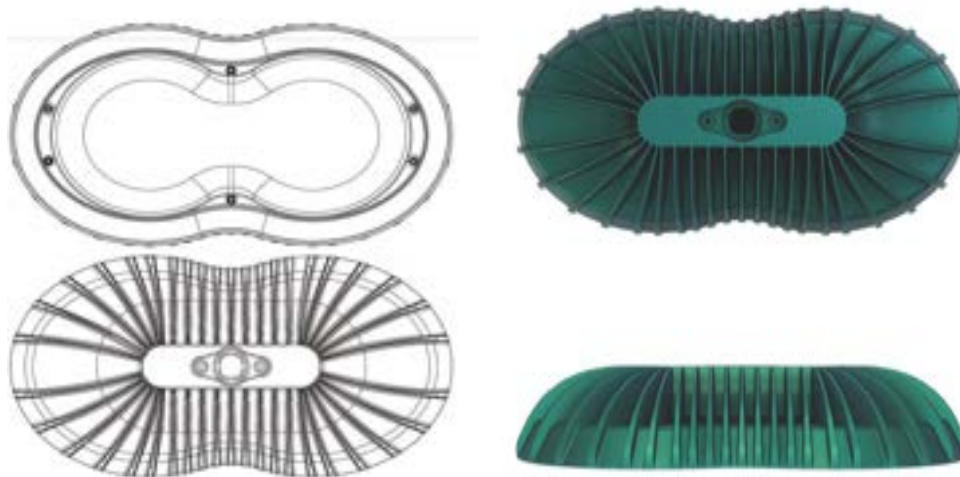


Figura 87. Modulo finale selezionato

Il modulo è caratterizzato da un design che si concentra sulla forma affusolata, organica e allo stesso tempo il più minimalista possibile che al contempo sia termicamente e otticamente funzionale. Questi due elementi sono stati studiati in maniera combinata in modo da rendere il modulo il più leggero possibile, utilizzando le proprietà dei flussi di aria e la capacità dissipativa sulle superfici per rendere l'oggetto equilibrato. Come visibile dalle immagini, la parte retrostante del modulo ospita un sistema di aggancio studiato sia per il passaggio dei cavi di alimentazione e controllo all'interno sia come sistema di connessione meccanica. Al modulo infatti viene innestato un elemento di sostegno equipaggiato da un passacavo al quale possano essere adattate diverse strutture di aggancio dipendenti dal design dell'intero sistema.

Inoltre, il modulo è stato pensato per essere agevolmente integrato in un sistema modulare funzionale ad assolvere alle prestazioni illuminotecniche di diverse categorie stradali: infatti, pur essendo unico per forma e dimensioni, la sua ripetizione in 4, 3 o 2 esemplari in sistemi modulari, determina il soddisfacimento dei requisiti delle differenti categorie illuminotecniche di riferimento. L'apparecchio viene dunque equipaggiato con un numero maggiore o minore di moduli rispetto ai requisiti illuminotecniche da soddisfare. Variabilità e versatilità di utilizzi è l'idea intrinseca del modulo che diventa elemento inseribile su un palo per diversi utilizzi e categorie illuminotecniche stradali diverse.

I moduli previsti sono (Figura 88):

- 4 Moduli per categorie ME3 (A-B-C)
- 3 Moduli per categorie ME4 (A-B)
- 2 Moduli per categorie ME5 - ME6

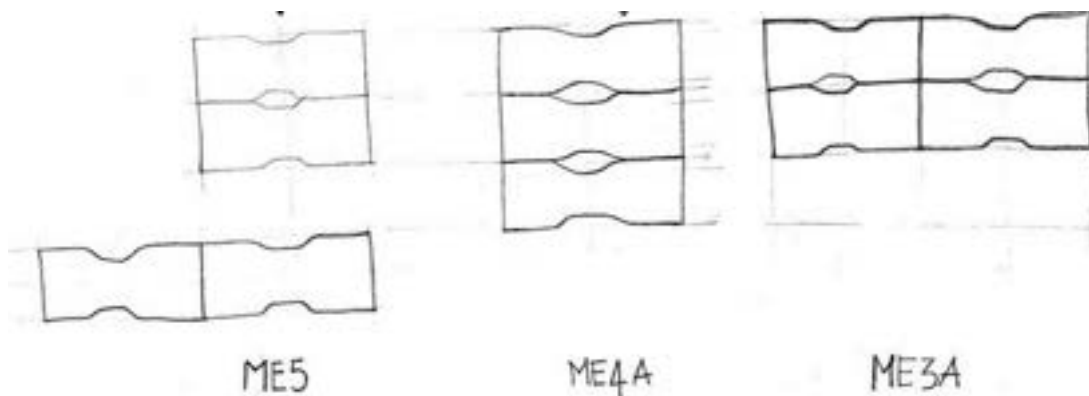


Figura 88. Visualizzazione delle possibili configurazioni dei moduli

Tale sistema modulare deve essere coadiuvato da un sistema struttura e di sostegno in grado di comporre le diverse taglie di illuminazione che sia in grado di assicurare semplicità di montaggio, riducendo peso, ingombro e materiale della struttura di sostegno ai moduli. Il sistema di sostegno strutturale dei singoli moduli deve essere riconfigurabile e soddisfare, allo stesso modo, la creazione di apparecchi di illuminazione di diversa taglia (ME3a, ME4a, ME5).

Il sistema è dunque costituito da due macro-blocchi funzionali distinti (rastrelliera di sostegno ai moduli configurabile per 3 moduli oppure per e) sistema di supporto e aggancio al palo completo del vano ausiliari. Tale elemento diventa formalmente molto importante sia per l'integrazione estetica di elementi funzionali solitamente molto ingombranti sia per garantire continuità tra pali classici e moduli LED. (Figura 89; Figura 90)

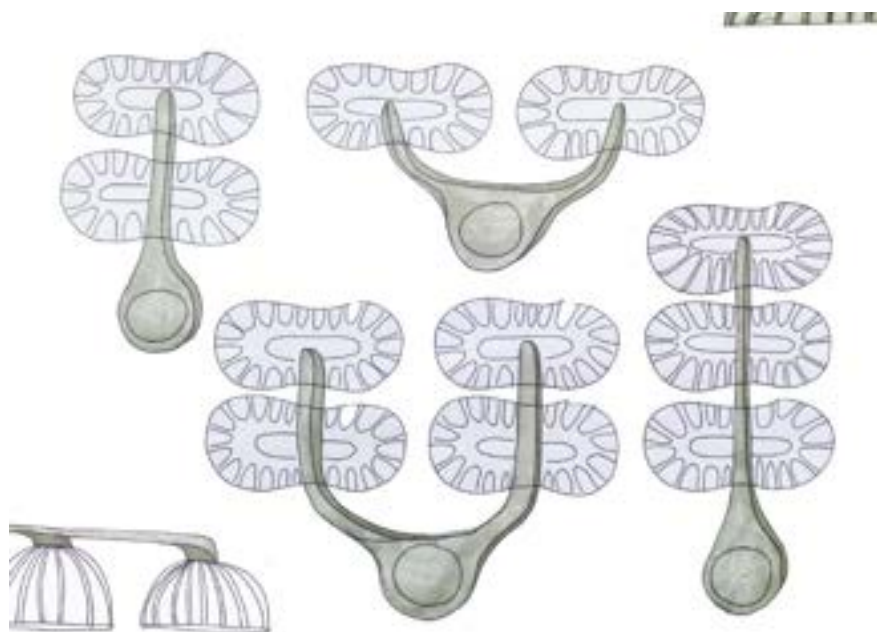


Figura 89: Sistema di disposizione dei moduli in base alle differenti configurazioni e applicazioni stradali



Figura 90: L'aggancio al palo diviene elemento funzionale al contenimento degli ausiliari elettrici

Il design finale del sistema PLUS ME dovrebbe risultare in un oggetto leggero, facilmente riconfigurabile e quindi modificabile anche per la manutenzione dei componenti (che possono essere estratti e sostituiti). Si

rimanda a paragrafo successivo per una visualizzazione dei concept di progetto dell'intero sistema modulare.

Progettazione modulo PLUS ME

Studio ottico e termico del modulo definitivo

Sulla base delle indicazioni fornite dallo studio preliminare, si è proceduto allo sviluppo del prodotto, attraverso il progetto del componente di supporto del PCB e schermatura per il rispetto dei vincoli di abbagliamento (TI%) e limitazione della dispersione del flusso luminoso verso l'alto.

Le principali differenze tra i modelli sviluppati in questa fase del progetto e i precedenti, riguardano la geometria delle lenti (Figura 91), approssimativa nella fase preliminare, maggiormente accurata nella fase successiva di sviluppo del prodotto e la presenza del driver all'interno del modulo, in posizione centrale tra i due blocchi di lenti (Figura 92).

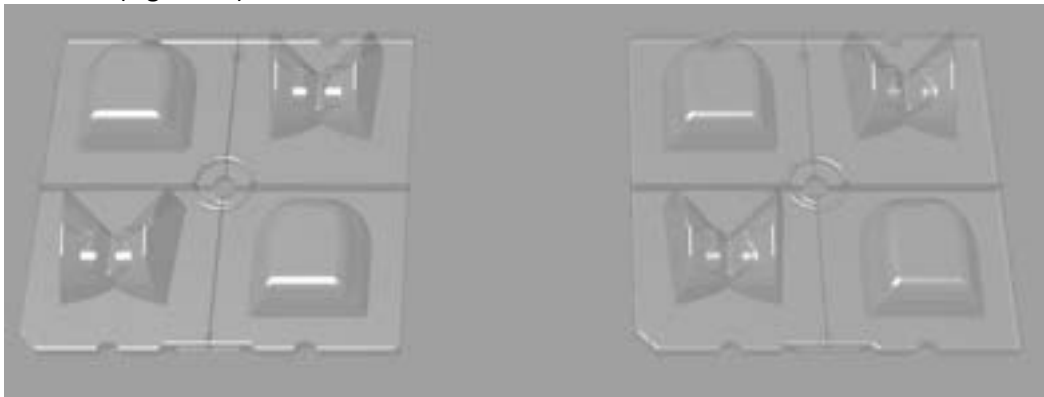


Figura 91 Geometria 3D delle lenti utilizzate nella fase di progetto (cortesia LEDIL)

A seguito delle prime simulazioni termiche, si è osservato che la sede del driver raggiungeva temperature troppo elevate incompatibili con una lunga durata del componente: si è quindi deciso di non inserire il componente all'interno del modulo, ma di utilizzare un unico driver per tutti i moduli posto nella base del palo.

Il valore di MTBF fornito dal costruttore MTBF (valutato secondo la norma MIL-HDBK217F) per una temperatura ambiente di 25°C risulta pari a 1700×10^3 hours; tuttavia non viene fornito alcun valore di tale parametro per temperature ambiente superiori a 25°C.

La nuova soluzione è stata adottata dopo aver esaminato una serie di proposte formali del modulo in cui il driver era stato spostato in una posizione più esterna, ma tutte le soluzioni esaminate sono risultate non soddisfacenti dal punto di vista estetico e funzionale²⁷

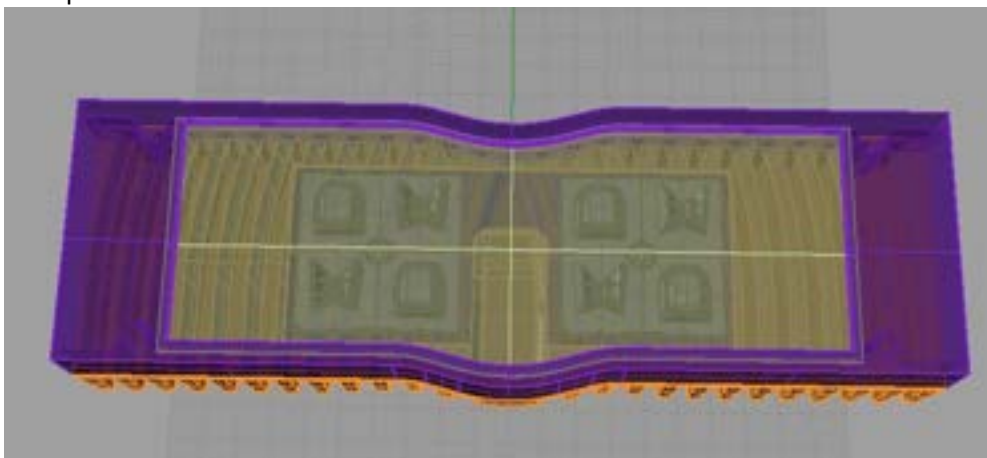


Figura 92 Versione iniziale del modulo con driver alloggiato nella parte centrale del modulo, tra i due blocchi di lenti

²⁷ Tutte le soluzioni presentavano inoltre il difetto di un aumento di peso e di impiego di materiale

Occorre infatti considerare che la massima temperatura raggiungibile da driver è compresa tra -40°C e +50°C riferita a temperatura ambiente di 25°C in regime di convezione naturale²⁸, mentre le condizioni di funzionamento all'interno del modulo potevano facilmente raggiungere i 50-55 °C a seconda delle configurazioni geometriche considerate (Figura 93).

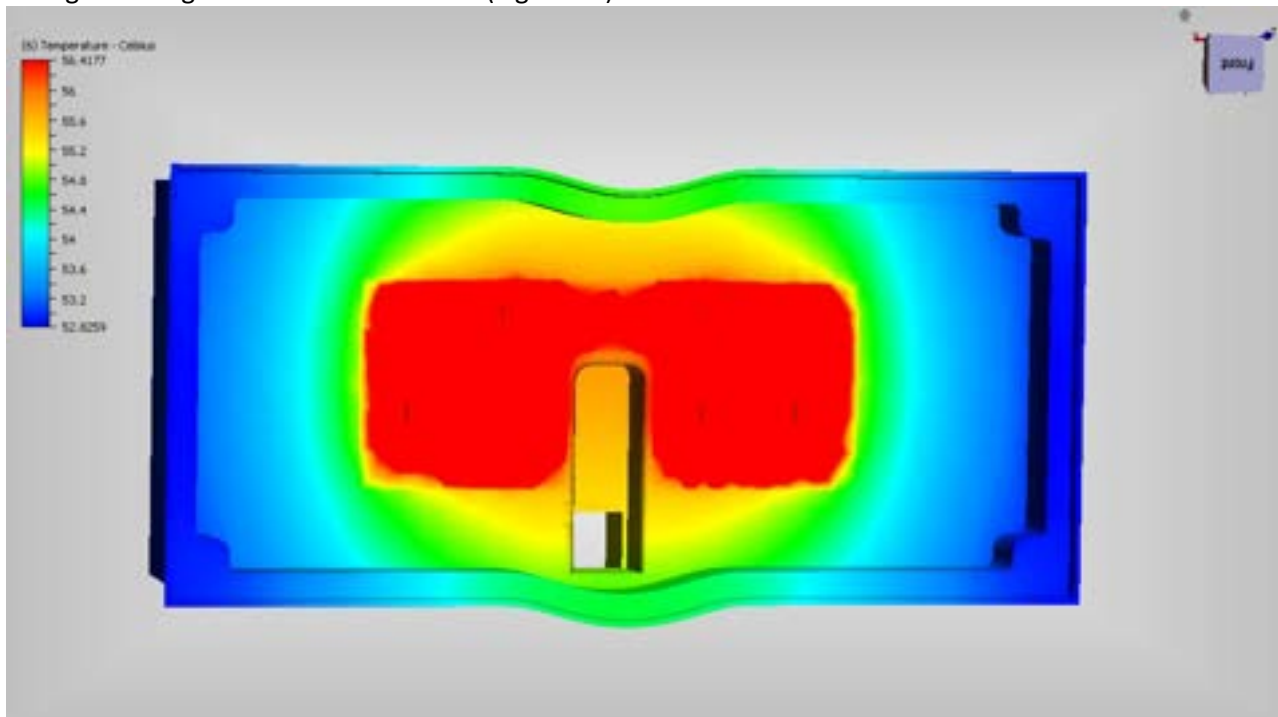


Figura 93 Distribuzione di temperatura nel vano riservato al led driver. Il valore di 55°C risulta estremamente cautelativo, in quanto le proprietà termiche del PCB risultano volutamente sottostimate

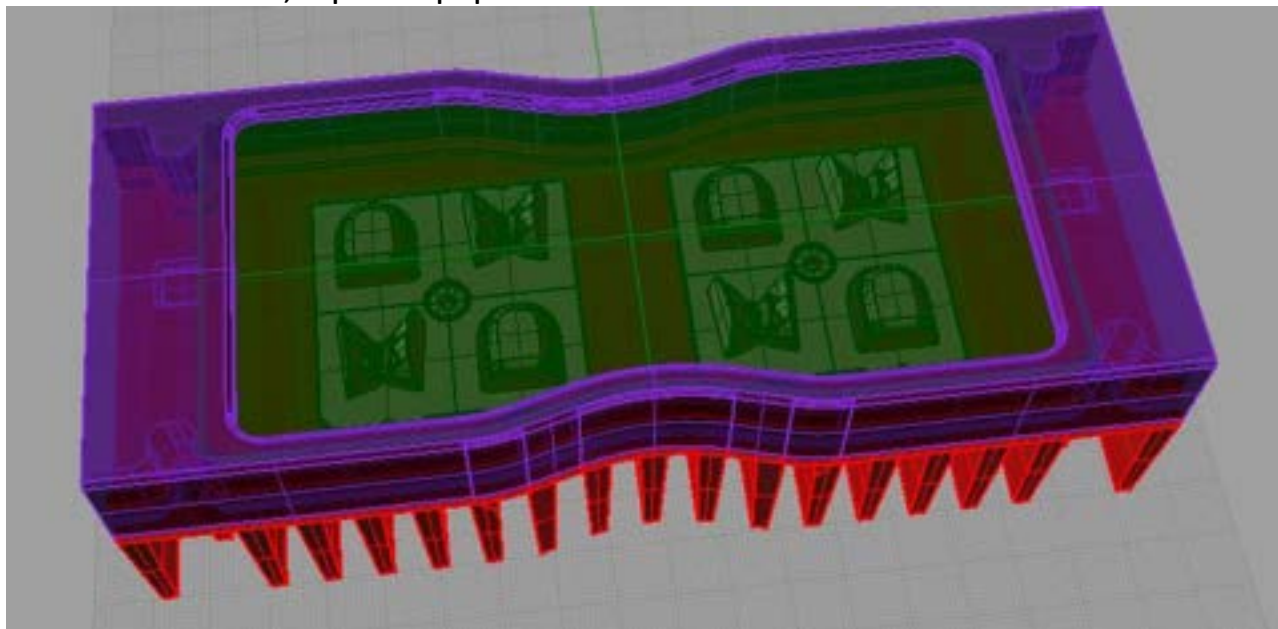


Figura 94 Versione priva del driver centrale. La lunghezza complessiva del modulo è stata rivista e i blocchi lenti avvicinati







A seguito della variazione della distanza tra i due gruppi di lenti, si è reso necessario ritornare alla fase di simulazione ottica, al fine di determinare le minime dimensioni della base (funzioni di dissipazione e di schermatura), in modo tale da non penalizzare eccessivamente le prestazioni fotometriche del sistema.

²⁸ Valori ricavati dal datasheet del produttore del led driver RECOM RDC-48 -1.20/M

Anche la posizione del fissaggio del modulo alla struttura dell'apparecchio è stata rivista a seguito dello spostamento del LED driver, in modo da cercare di ottimizzare al meglio gli ingombri del sistema e le relative prestazioni fotometriche






A tale scopo sono state sviluppate una serie di proposte per il modulo e per lo schermo di chiusura, riassunte nella Tabella 6.

Tabella 6 Valutazione fotometrica differenti geometrie per la realizzazione del modulo e dello schermo di protezione

Visualizzazione modello 3D	Rendimento sistema ottico complessivo ²⁹	Fattore di utilizzazione	Rispondenza ai requisiti illuminotecnici Classe ME3 ³⁰	U ₀	U ₁
	$\eta=75.56\%$	$K_u=0.400$	SI	0.41	0.70
	$\eta=80.95\%$	$K_u=0.433$	SI	0.41	0.70
	$\eta=81.36\%$	$K_u=0.438$	NO	0.41	0.67
	$\eta=81.16\%$	$K_u=0.441$	NO	0.40	0.68
	$\eta=80.69\%$	$K_u=0.433$	SI	0.41	0.70
	$\eta=80.59\%$	$K_u=0.433$	NO	0.41	0.67

²⁹Non viene considerato il rendimento della lente, che risulta pari a 0.93 circa. Lo scopo è quello di confrontare le soluzioni geometriche di schermatura e l'influenza delle diverse forme schermo di chiusura sulle prestazioni impiantistiche.

³⁰La rispondenza viene verificata rispetto all'impianto di test definito precedentemente. L'impianto soddisfa i requisiti minimi di interdistanza tra i centri luminosi previsti dalla legge Regione Lombardia 17 del 2000 e successive modificazioni

	$\eta=80.57\%$	$K_u=0.433$	NO	0.41	0.69
	$\eta=80.80\%$	$K_u=0.434$	NO	0.41	0.67
	$\eta=80.78\%$	$K_u=0.433$	SI	0.41	0.70
	$\eta=80.73\%$	$K_u=0.433$	NO	0.41	0.67
	$\eta=80.67\%$	$K_u=0.431$	NO	0.40	0.69

Interfaccia Termica

Il fissaggio del PCB sul dissipatore deve garantire un buon trasferimento termico del calore generato dai LED (che assicura buone prestazioni in termini di flusso luminoso emesso e un suo decadimento nel tempo secondo quanto previsto dal costruttore del semiconduttore) e una stabilità meccanica adeguata (resistenza alle vibrazioni).

La pressione tra PCB e dissipatore per garantire un buon contatto termico si aggira attorno a 0.35 MPa (il valore è riferito all'accoppiamento tra la star del MCPCB e il dissipatore mediante 3 viti poste a 120°³¹). Nel nostro caso la pressione di contatto tra il MCPCB e il dissipatore è assicurata da 4 viti autofilettanti, che dovrebbero garantire una pressione di contatto adeguata tra interfaccia termica, dissipatore e PCB.

La superficie di contatto tra PCB e dissipatore non sono mai perfettamente lisce e piane, ma possiedono una certa scabrosità dovuta a microscopiche rugosità e piccoli incavi all'interno del materiale.

Quando il PCB viene fissato sul dissipatore, si ha il contatto delle sole "parti sporgenti", mentre gli incavi formano delle cavità riempite d'aria, che rappresenta un cattivo conduttore termico che peggiora lo scambio termico tra il sistema costituito dai LEDs +PCB e dissipatore.

Esistono molti materiali da frapporre tra il PCB e il dissipatore che consentono di migliorare lo scambio termico, diminuendo il valore della resistenza termica complessiva del sistema: paste e collanti termoconduttivi offrono una bassa resistenza termica, ma necessitano una certa cautela nel processo produttivo per evitare sbavature sulle lenti e fuoriuscita di materiale dai bordi.

³¹ Valore è tratto da OSRAM Opto Semiconductors, "OSTAR-Lighting", Nota applicativa

Materiali a cambio di fase, elastomeri termoconduttivi, nastro adesivo termoconduttivo, non hanno problemi di fuoriuscita di materiale né è necessario attendere un tempo di indurimento, ma offrono una conduttività più bassa rispetto alle soluzioni precedenti e richiedono la necessità di esercitare una certa pressione tra le due parti poste a contatto.

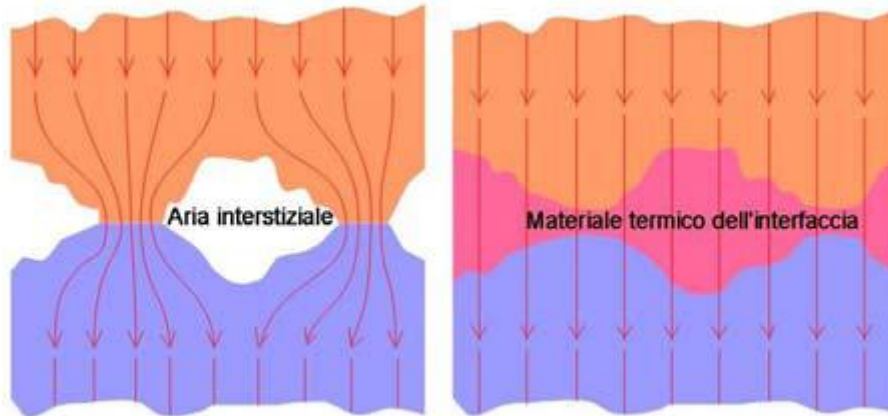


Figura 95 Scambio di calore in assenza e in presenza di un materiale termoconduttivo³²

La Tabella 7 analizza i vantaggi e gli svantaggi delle diverse soluzioni possibili; per la costruzione del prototipo la soluzione raccomandata è l'impiego di pasta termo-conduttiva. Altre soluzioni potranno essere valutate solo in fase di ingegnerizzazione del prodotto, mettendo a confronto il maggiore costo del componente con la riduzione e semplificazione del processo di assemblaggio del componente.

Tabella 7 Vantaggi e Svantaggi dei materiali abitualmente utilizzati come interfaccia termoconduttiva

Denominazione	Materiale	Vantaggi	Svantaggi
Pasta termoconduttiva	Si basa tipicamente su silicone munito di particelle termoconduttivo	Contatto sottilissimo Richiede una pressione minima	Fuoriuscita di materiale dai bordi e dagli spigoli Pericolo di imbrattamento della produzione di massa
Collanti termoconuttivi	Pasta termoconduttiva perfezionata- Film a struttura gommosa dopo l'indurimento	Alta conduttività termica Mancanza di distacco	La pasta può fuoriuscire con il tempo I collanti hanno bisogno di un processo di indurimento di qualche ora.

³² OSRAM Opto Semiconductors, "OSTAR-Lighting", Nota applicativa

Materiale a cambio di fase	Materiale poliestere o acrilico riempito di particelle termoconduttive, con basse temperatura di	Maneggio e montaggio facili Nessun distacco Nessun tempo di indurimento	Richiede di esercitare una certa pressione Necessità di trattamento termico preventivo
Elastomeri termoconduttivi	Base di materiale plastico e silicone, riempiti con particelle termoconduttive, spesso rinforzate con fibre di vetro o film dielettrici	Nessuna fuoriuscita di materiale Nessun bisogno di indurimento	Probabilità di distacco Conduktività termica media, rispetto ad altre soluzioni Necessità di esercitare pressione
Nastro termoconduttivo	Nastro adesivo da entrambi i lati, riempiti di particelle e fornito di caratteristiche termiche ed adesive equilibrate	Nessuno fuoriuscita o trafilazione di materiale tra le due superfici di contatto	

I requisiti di progetto che devono essere soddisfatti per quanto riguarda la massima temperatura del PCB sono essenzialmente due:

- In nessun punto la temperatura della scheda dovrà superare gli 80°C, al fine di evitare possibili problemi di ingiallimento o deterioramento delle lenti, poste a contatto con il PCB³³
- La temperatura massima di giunzione non deve mai superare gli 80°C

Simulazioni termiche per la definizione del modulo





Per ciascuna delle proposte di modulo sviluppate, sono state anche verificate le prestazioni termiche valutate sulla base alla temperatura media di giunzione e al valore minimo e massimo della temperatura raggiunte dalle alette di dissipazione.

I risultati ottenuti sono stati riassunti nella

Tabella 8: in queste simulazioni il materiale utilizzato per il PCB è quello standard del programma di simulazione termica.



³³ Valori più elevati della temperatura del case (>85°C) renderebbero difficile la stima del decadimento del flusso luminoso nel tempo (85°C è un valore standard nella LM-80)

Tabella 8 Simulazioni termiche per le differenti configurazioni del sistema di dissipazione

Visualizzazione modello 3D	T_j^{34}	Temp. Dissipatore ³⁵		Caratteristiche e osservazioni
		T_{min}	T_{max}	
	$T_j=73^\circ\text{C}$	$T_{min}=52.8\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{max}=56.4^\circ\text{C}$	Materiale: alluminio Forma: alettature parallele piene
	$T_j=71^\circ\text{C}$	$T_{min}=51.7\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{max}=55.4^\circ\text{C}$	Materiale: alluminio Forma: alettature parallele sfalsate per migliorare il passaggio dell'aria
	$T_j=78^\circ\text{C}$	$T_{min}=60.2\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{max}=62.6^\circ\text{C}$	Materiale: alluminio Forma: alette radiali a partire da un elemento centrale e fori Osservazione: il modulo emette luce sicuramente verso l'alto
	$T_j=81^\circ\text{C}$	$T_{min}=60.15\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{max}=62.94^\circ\text{C}$	Materiale: alluminio Forma: alette radiali a partire da un elemento centrale e fori; inserimento di una copertura per evitare l'emissione di luce verso l'alto

³⁴ Temperatura media di giunzione

³⁵ Temperatura minima e massima raggiunta dalle alette del sistema di dissipazione

	$T_j=78^{\circ}\text{C}$	$T_{\min}=57.8^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}=60.0^{\circ}\text{C}$	Materiale: alluminio Forma: alette radiali a partire da un elemento centrale
	$T_j=74^{\circ}\text{C}$	$T_{\min}=53.1^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}=55.4^{\circ}\text{C}$	Materiale: alluminio Forma: alette radiali a partire da un elemento centrale

Simulazione termica modulo selezionato

La simulazione termica è stata condotta con le stesse modalità utilizzate nella fase di selezione della migliore configurazione delle alette di dissipazione, utilizzando però il modello del MCPCB descritto nel paragrafo precedente.

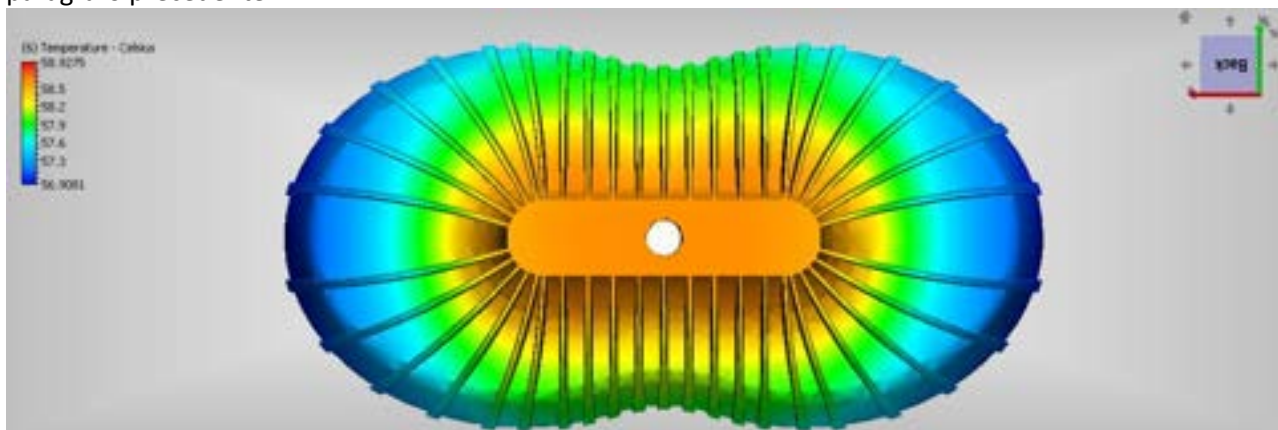


Figura 96 Distribuzione delle temperature sulle alette di dissipazione

Lo schermo di chiusura del dispositivo è stata simulato assegnando come materiale il vetro, tuttavia l'esame dei peso complessivo dell'apparecchio ha suggerito di realizzare tale componente di metacrilato (PLEXIGLAS® 8N)³⁶.

La temperatura media di giunzione risulta pari a 73°C, mentre la temperatura del PCB in corrispondenza del LED risulta pari a circa 66°C: entrambi i valori sono al di sotto del limite prefissato.

La Figura 96 mostra la distribuzione di temperature sul lato alettato del dissipatore, mentre la Figura 97, mostra quella relativa al PCB.

³⁶ Il cambiamento di materiale, non altera in modo significativo il regime termico del modulo.

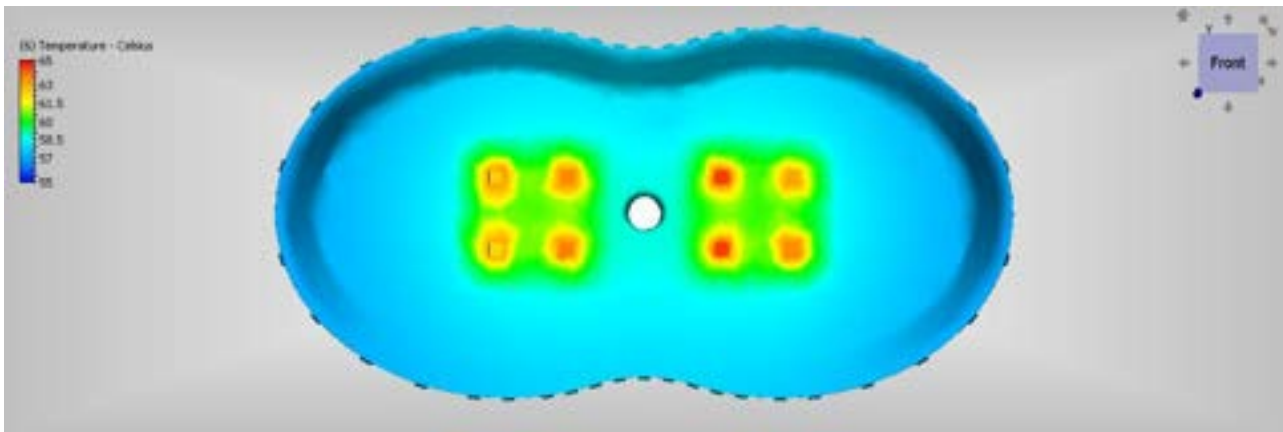


Figura 97 Distribuzione delle temperature sul PCB

In queste condizioni di temperatura di giunzione, il flusso emesso led risulta pari a 407.5 lm@ 1.2 A, con una efficienza pari a 116.4 lm/W. La potenza assorbita da ciascun modulo risulta pari a 3.5 W*8 LEDs=28 W, escluse ovviamente le perdite sul sistema di alimentazione.

Il flusso emesso dal sistema costituito da 4 LED e dalla rispettiva lente si aggira attorno a 407.5 lm*4 LEDs*0.93=1515.9 lm a cui deve essere sottratta la frazione di flusso assorbita dal supporto³⁷ e la parte inter-riflessa all'interno del vano ottico.

Fotometria modulo selezionato

La distribuzione fotometrica, nei piani C0-180° e C90-270°, ottenuta mediante simulazione ray-tracing è riportata alla Figura 98. Il flusso luminoso emesso dal singolo modulo dell'apparecchio risulta pari a 2461 lm, tenuto conto della schermatura meccanica del dissipatore e dello schermo di chiusura. Il valore indicato è stato determinato supponendo che la temperatura di giunzione sia pari a 70°C con una corrente di alimentazione dei LEDs pari a 1.2 A.

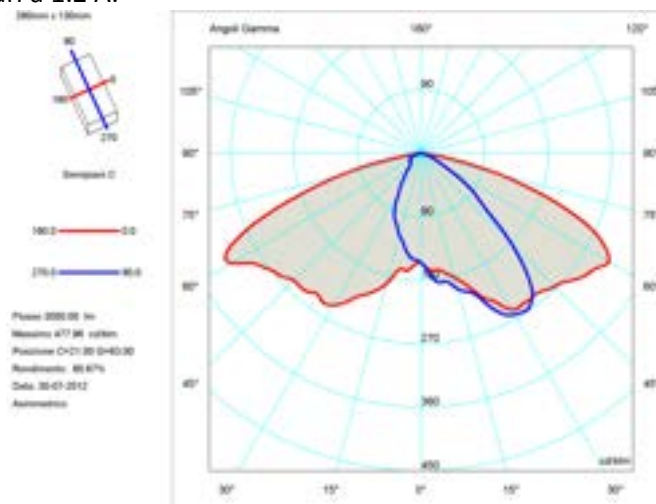


Figura 98 Indicatrici di emissione nei piani C0-180° e C90-270°

Il fattore di utilizzazione dell'apparecchio è riportato alla Figura 99, mentre le risultanze impiantistiche ottenute componendo l'emissione di 4 moduli, sono indicate alla Figura 100. La geometria dell'impianto prevede un'altezza di installazione pari a 8 m, una disposizione unilaterale dei centri luminosi e una interdistanza tra i centri pari a 29.6 m, pari a 3.7 volte l'altezza. Il coefficiente di manutenzione è stato assunto pari a 0.8.

³⁷ Considerato perfettamente assorbente nella simulazione fotometrica

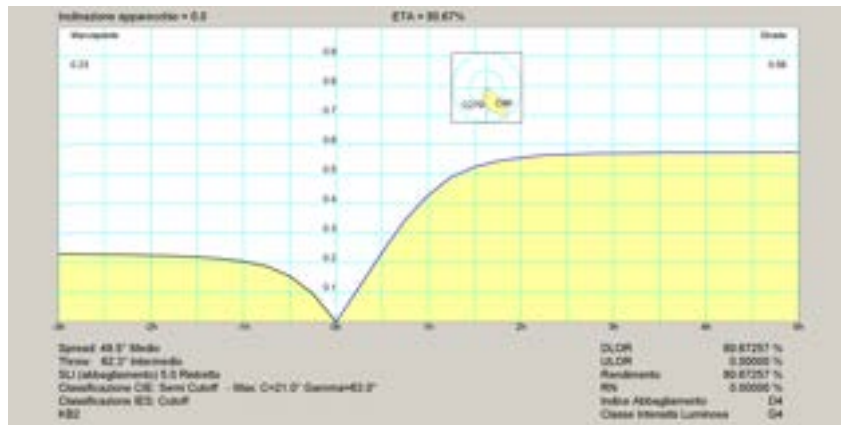


Figura 99 Fattore di utilizzazione modulo PLUS ME



Fattore di manutenzione: 0.80

Scale 1:255

Lista campo di valutazione

- 1 Campo di valutazione Carreggiata 1
Lunghezza: 29.000 m, Larghezza: 8.000 m
Reticolo: 30 x 6 Punti
Elementi stradali corrispondenti: Carreggiata 1
Manto stradale: C2, q0: 0.075
Classe di illuminazione selezionata: ME3a

Valori reali calcolati:
Valori nominali secondo la classe:
Rispettata/non rispettata:

(Tutti i requisiti fotometrici sono rispettati)

E_{av} [cd/m ²]	UGR	LI	Ti (%)	SR
1.39	0.42	0.70	10	0.62
≥ 1.00	≤ 0.40	≥ 0.70	≤ 15	≥ 0.50
✓	✓	✓	✓	✓

Figura 100 Risultati impiantistici dati dalla combinazione di 4 moduli identici

Dall'esame dei risultati alla Figura 100, si osserva che l'apparecchio soddisfa i requisiti della categoria illuminotecnica ME3a.

Decadimento del flusso luminoso

Per la stima del decadimento del flusso luminoso nel tempo, occorre fare riferimento ai dati forniti dal costruttore e rilevati in accordo alla norma IES LM-80³⁸.

La norma citata prevede che la campionatura di LEDs in esame siano fatti funzionare in condizioni ambientali controllate (camera climatica) e che la temperatura dell'aria attorno al LED package sia attivamente controllata mediante la regolazione della portata dell'aria. I test vengono condotti per 3 differenti temperature del case, 55°C, 85°C e un terzo valore prescelto dal costruttore, per differenti valori della corrente di alimentazione, con umidità inferiore al 65% (RH<45% nel caso del report citato), con una temperatura ambiente (aria) all'incirca uguale a quella del case nel solder point.

Per almeno 6000 ore (meglio se esteso a 10000 ore, se si vuole aumentare l'affidabilità della stima) i valori del flusso luminoso e della cromaticità dei LEDs vengono rilevati a intervalli di almeno 1000 ore di funzionamento.

I risultati del test sono riportati alla Figura 101, in funzione della temperatura del case e della corrente di pilotaggio del LED.

³⁸ CREE, Application Note "Cree® XLamp® LEDIES LM-80-2008 Testing Results", Revision: 9 (May 31, 2012)

Test Summary

Data Set	Case Temp. [T _c]	Ambient Temp. [T _a]	Drive Current [I _d]	Average Lumen Maintenance at 6,000 hours	Average Chromaticity Shift (Δu'v') at 6,000 hours	Reported TM-21 L70 Lifetime
4	55°C	55°C	1500 mA	99.4%	0.0026	L70(6k) > 36,300 hrs
5	85°C	85°C	1500 mA	96.0%	0.0022	L70(7k) > 42,300 hrs
6	105°C	105°C	1500 mA	96.9%	0.0017	L70(7k) > 42,300 hrs
1	45°C	45°C	2000 mA	98.4%	0.0021	L70(6k) > 36,300 hrs
2	55°C	55°C	2000 mA	98.3%	0.0021	L70(6k) > 36,300 hrs
3	85°C	85°C	2000 mA	97.2%	0.0022	L70(6k) > 36,300 hrs

Figura 101 Risultati del decadimento del flusso luminoso in accordo con la norma IES LM-80 per il LED utilizzato nella progettazione del modulo (dati 27 Gennaio, 2012)

Dall'esame dei dati della tabella si conclude che per una corrente di 1.5 A (cfr. con 1.2 A di progetto) e per una temperatura del case di 85°C (quella stimata per l'applicazione non supera i 70°C)³⁹, il decadimento del flusso luminoso dopo 6000 h di funzionamento, risulta pari al 96% di quello iniziale.

L'aspettativa di vita del componente, intesa come riduzione del flusso luminoso al 70% rispetto al suo valore iniziale, sulla base del metodo descritto dalla Technical Report TM-21, risulta maggiore di 42000 ore di funzionamento⁴⁰.

Per il calcolo i dati relativi alle prime 1000 ore sono ignorati e il limite superiore alla stima è di pari a 6 volte il periodo di tempo per cui sono disponibili i dati: per questo motivo il valore calcolato può risultare differente da quello riportato dal costruttore.

La stima è ottenuta attraverso una estrapolazione esponenziale del fitting ai minimi quadrati dei dati dei dati di misura tra 1000 ore e 6000 ore (o 10000 ore se disponibili).

Schermo di chiusura per il modulo selezionato

Il progetto del modulo prevede l'impiego di uno schermo di chiusura per la realizzazione del grado di protezione IP contro l'ingresso di liquidi e solidi. (Figura 102)

³⁹ Lo standard IES LM-80 prevede che i componenti vengano testati

⁴⁰ Per la stima il costruttore ha utilizzato un data set di 7000 ore di funzionamento, in accordo con i requisiti della IES LM-80



Figura 102: Design della coppa di protezione del modulo

Il livello minimo raccomandato per questo tipo di applicazione è IP 5x per il vano ottico⁴¹; la forma dello schermo è stata studiata come compromesso di un design gradevole e di prestazioni fotometriche efficienti.

Non si ritiene infatti ragionevole, malgrado il lento decadimento del flusso luminoso nel tempo, ipotizzare un apparecchio LED che sia inserito in un impianto per cui non è previsto un ciclo di pulizia delle parti ottiche: questa assunzione richiederebbe di sovradimensionare in modo notevole il flusso emesso dall'apparecchio, con un incremento di costi di primo impianto non giustificabili.

La scelta progettuale è motivata dal fatto che l'apparecchio dovrà essere installato in strade a traffico veicolare, dove si può avere una notevole presenza di polvere, aggressivi chimici dovuti alle piogge acide, umidità, fumi di scarico dei veicoli (presenza di idrocarburi).

Si ritiene inoltre che le operazioni di pulizia debbano essere le più rapide possibili senza pregiudicarne l'efficacia: solo l'adozione di uno schermo di chiusura liscio e facilmente accessibile è garanzia di questo risultato (si immagini la difficoltà di dover pulire 32 superfici molto piccole, con forme complesse in cui le particelle di pulviscolo e di sporco possono rimanere imprigionate all'interno delle curvature).

Per quanto riguarda gli effetti della radiazione UV, il materiale delle lenti (Plexiglass 8N) risulta molto stabile verso questo tipo di degrado (soddisfa i requisiti della norma SAE J 576).

La norma SAE J 576 specifica i requisiti che devono essere soddisfatti per i materiali plastici delle lenti di protezione della fanaleria, come richiesto dalla normativa statunitense (Federal Motor Vehicle Standard Bo. 571.108): essa prevede l'esposizione per 3 anni di 20 campioni di materiale plastico (5 per 3 differenti spessori) alle intemperie (in Florida e Arizona che presentano un clima caldo umido e caldo secco rispettivamente). I campioni, che devono presentare una superficie piana di almeno 32 cm² sono posti ad almeno 30 cm da terra, inclinati di 45° rispetto l'orizzontale e rivolti verso Sud.

Dopo l'invecchiamento, i campioni non devono presentare rotture, crepe, cambiamenti di colore; la trasmittanza non deve essere variata più del 25% rispetto al campione non esposto.

Viene inoltre valutata l'opacizzazione del materiale (Haze) con un limite del 30% rispetto al materiale prima del ciclo di condizionamento.

⁴¹ Cfr. con quanto riportato nella pubblicazione CIE 154:2003 "The maintenance of outdoor lighting system" al punto 3.3

Stante i requisiti molto rigidi di questa norma, si ritiene che la stabilità ai raggi UV e agli agenti atmosferici possano essere garantiti dall'impiego del materiale indicato.

Design dell'apparecchio

Il prodotto risulta composto da 2-3-4 moduli a seconda della categoria illuminotecnica da realizzare; ciascun modulo risulta composto da un supporto/dissipatore in alluminio verniciato o anodizzato, da due moduli LED (4 LED CREE XM-L selezione T6 per modulo) accoppiati con 4 lenti (2DW e 2 DN) fissati al dissipatore mediante viti autofilettanti (Figura 103).

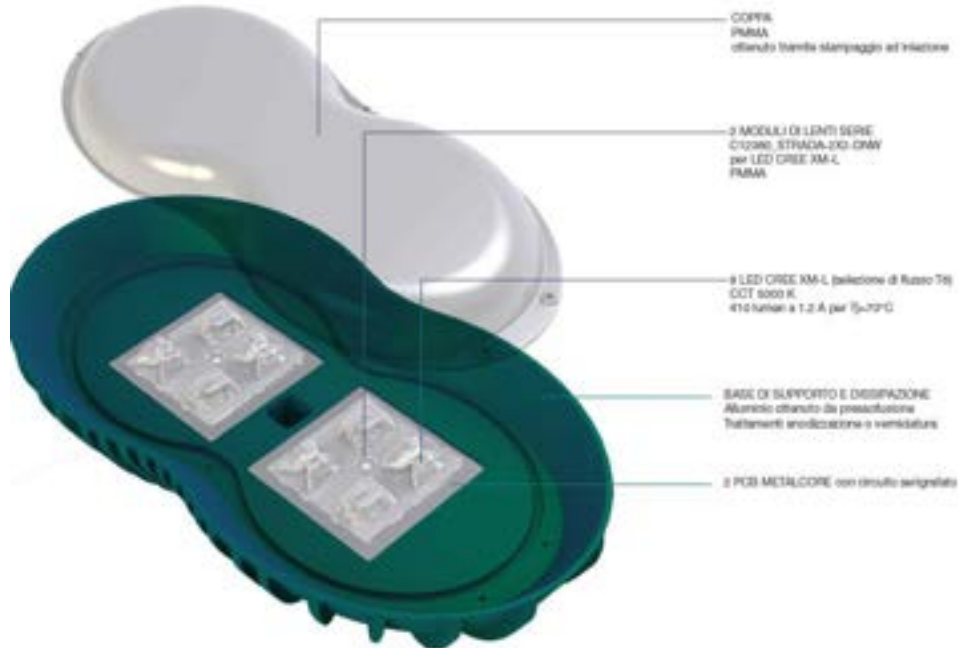


Figura 103 Esploso delle componenti del modulo

La corrispondenza tra categoria illuminotecnica e numero di moduli (Figura 104), nonché i risultati impiantistici di ciascuna configurazione dell'apparecchio rispetto all'impianto di test, sono riportati in maggior dettaglio nel documento "PLUS^{ME} Public Lighting Unit System for ME street lighting categories" allegato alla presente relazione.

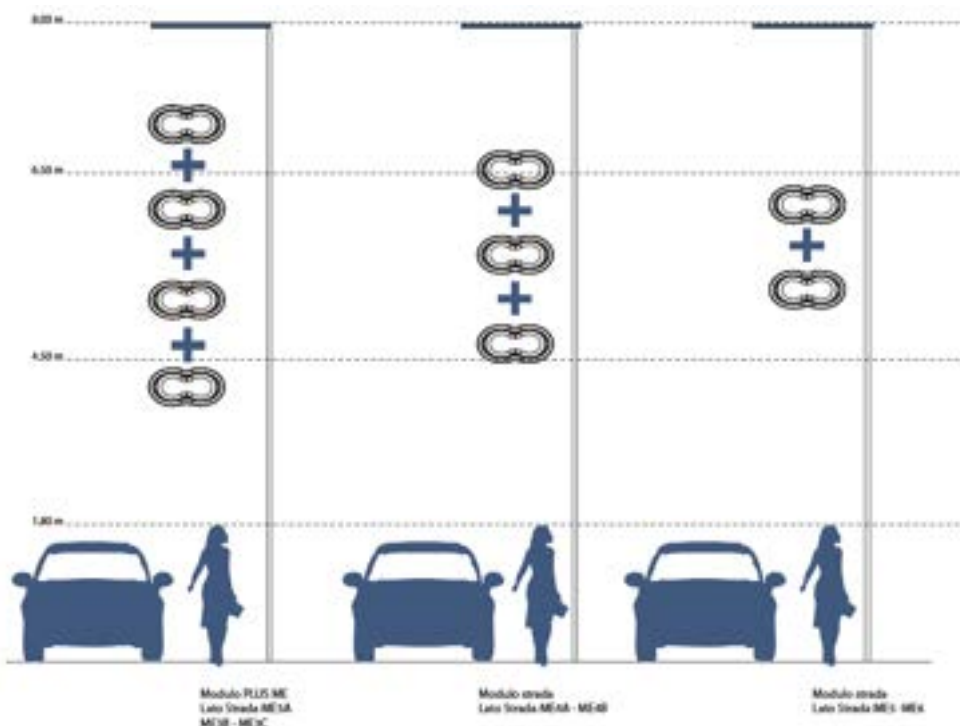


Figura 104 Corrispondenza tra categoria illuminotecnica e numero di moduli dell'apparecchio. Altezza di installazione $H=8m$, con larghezza della carreggiata pari a $8m$. Disposizione centri luminosi su una fila con interdistanza pari a $3.7 H$.

A titolo di esempio si riporta il concept relativo alla configurazione a 4 moduli, adatta alla categoria illuminotecnica ME3a. Per un maggiore approfondimento, si rimanda ai rendering delle differenti configurazioni e dei differenti concept presenti nella presentazione relativa al progetto PLUS ME.



Figura 105 Possibili concept di prodotto, utilizzando 4 moduli per il soddisfacimento dei requisiti della categoria illuminotecnica ME3a.

Il peso di ciascun modulo è pari a circa $1kg$, e risulta così suddiviso tra i due componenti principali:

- 921 gr per il dissipatore in alluminio
- 85 gr per la coppa in PMMA

Il sistema di alimentazione è stato posto al di fuori del modulo, nel sistema di fissaggio al palo, per le considerazioni di natura termica illustrate in precedenza. La scelta è caduta un alimentatore TCI Smart Street 150 (Figura 106), che garantisce l'intensità di corrente desiderata ($1200 mA$).



Figura 106 Alimentatore TCI Smart Street 150

L'alimentatore è in grado di alimentare 4 moduli collegati in serie fornendo una tensione massima di 115 V alla corrente di 1200 mA: il suo posizionamento lontano da altre fonti di calore dovrebbe consentire di non superare la massima temperatura di 80°C sul punto di test.

Conclusioni

Il rapporto di ricerca descrive l'intero processo di progettazione, a partire dalle fasi iniziali di definizione delle specifiche e dello stato dell'arte fino alla progettazione di dettaglio della parte ottica e termica di un apparecchio a LED modulare adatto per la categoria illuminotecnica ME3a.

Il processo di progettazione ha occupato circa 6 mesi dell'anno durante i quali sono state introdotte nel mercato numerose novità nel campo dei LEDs e delle componenti ottiche.

Basti infatti considerare l'introduzione sul mercato del nuovo LED Array di produzione LUMILEDS LUXEON M con valori di efficienza e rapporto prestazione prezzo molto interessanti.

Anche i costruttori di lenti hanno proposto sul mercato nuove soluzioni ottiche: basti pensare alle lenti stradali per LUXEON M (Figura 107) di produzione LEDIL o all'arricchimento della gamma di lenti a distribuzione asimmetrica proposti da T-LED, che coprono ormai i più diffusi modelli di Power LED presenti sul mercato .



Figura 107 Lente per LED Array LUMILEDS Luxeon M

Anche per il LED considerato nel presente progetto, il costruttore ha reso disponibili componenti di selezioni superiori a quella considerata nello sviluppo del modulo e ha annunciato l'applicazione della nuova tecnologia SC³ anche a questa famiglia di prodotti con un deciso miglioramento delle performance e una riduzione dei costi.

L'idea di un apparecchio modulare si dimostra quindi la soluzione migliore per aggiornare il prodotto a fronte di questi continui cambiamenti tecnologici e prestazionali delle componenti LED, senza dover rivedere il progetto in maniera totale: il sistema proposto è in grado di dissipare circa 30 W per modulo, mantenendo la temperatura di giunzione a valori accettabili per questa applicazione ($T_j < 80^\circ\text{C}$) che garantiscono un decadimento del flusso luminoso nel tempo molto lento.

L'adozione di lenti organizzate in gruppi di 4 elementi montate su un MCPCB di 60x56 mm, facilita il montaggio del modulo e consente, se necessario, l'utilizzo di componenti di fornitori differenti, o modelli diversi dello stesso costruttore, se si desidera variare la distribuzione fotometrica del prodotto.

Alcune delle lenti esaminate nel corso del progetto (es. LEDIL) risultano disponibili anche per LED differenti da quello considerato (per esempio LUXEON M), in modo da consentire una certa flessibilità nella configurazione del prodotto.

L'unico vero vincolo dello sviluppo proposto risulta la potenza che è possibile dissipare su ciascun modulo: il valore di 30 W rappresenta secondo noi il giusto compromesso tra costo del prodotto (consumo di materiale), prestazioni (peso del singolo modulo e dell'apparecchio completo) e flessibilità.

Concludendo, qualora si volesse realizzare un prototipo del modulo PLUS ME sarebbe necessario rivedere e aggiornare la parte relativa alle sorgenti LED e le ottiche, selezionando nuovamente le componenti più performanti presenti sul mercato.

Per quanto concerne la parte di design dell'apparecchio completo, la presente ricerca si è focalizzata principalmente sul fornire una serie di proposte concettuali che, in maniera del tutto dimostrativa, visualizzino le diverse possibilità formali e funzionali di tale idea modulare e destrutturata.

Lista degli allegati

DESIGN_PROGETTOENEA_PLUSME_ATTIVITA_C2

File formato PDF contenente presentazione del progetto ottico e termico del modulo PLUS ME e concept di prodotto.

MODULO_PLUS_ME_COMPLETO_STEP

cartella contenente il modello completo (assieme) 3D in formato STEP

MODULO_PLUSME_COMPLETO

MODULO_PLUS_ME_PARTI_STEP

cartella contenente le parti che costituiscono il modello 3D in formato STEP

MODULO_PLUSME_BASEDISSIPATORE

MODULO_PLUSME_COPPA

MODULO_PLUSME_LENTI

MODULO_PLUSME_PCB

MODULO_PLUSME_TAVOLE_ASSEMBLING

cartella contenente le tavole di assieme e delle parti in formato DWG

MODULOPLUSME_TAVOLA_ASSEMBLING

MODULOPLUSME_TAVOLA_BASEDISSIPATORE

MODULOPLUSME_TAVOLA_COPPA

MODULOPLUSME_TAVOLA_PCB



Curriculum del gruppo di lavoro LABORATORIO LUCE - POLITECNICO DI MILANO

Sito web: www.luce.polimi.it

Avviato nel 2002 il Laboratorio supporta la didattica e sviluppa contemporaneamente la ricerca progettuale applicata in collaborazione con le aziende del settore. Inoltre fornisce un importante contributo per il mercato dell'illuminazione, per prove e collaudi per progetti innovativi nel settore della luce e del colore. Il laboratorio opera sotto il coordinamento scientifico del prof. Maurizio Rossi (prof. Associato) e ha come collaboratori il prof. Francesco Murano (ricercatore), l'ing. Fulvio Musante, il dr. Andrea Siniscalco, l'ing. Danilo Paleari (assegnisti di ricerca) e la dr.ssa Daria Casciani (dottoranda).

FORMAZIONE E DIVULGAZIONE

Il laboratorio offre agli studenti, nell'ambito del loro percorso didattico dei corsi di laurea, la possibilità di sperimentare nuovi concept e di verificare ciò che si è progettato e costruito, affiancando il sapere con il saper fare. Presso il laboratorio si tengono inoltre dal 2004 il Master in Lighting Design & LED Technology del Politecnico di Milano e molti corsi di formazione permanente del settore illuminotecnico.

Seminari e Convegni – Dal 2002 ogni anno viene organizzato un convegno, Lighting Innovation, che vuole essere un momento di incontro tra i vari attori del mondo dell'illuminazione. Università, professionisti e aziende si ritrovano per dare luogo ad incontri che puntano a una condivisione e confronto di saperi che contribuisce a stimolare il panorama illuminotecnico italiano.

RICERCA

Tra gli interessi di ricerca del laboratorio si annoverano: aspetti percettologici e foto-colorimetrici per differenti condizioni di illuminazione, ricerche progettuali per nuovi apparecchi di illuminazione sia dal punto di vista estetico-formale sia tecnico-funzionale, consulenza al progetto di impianti di illuminazione in interni ed esterni, consulenza per avvio di progetti di ricerca finanziati su bandi pubblici, ricerca metrologica.

Lo stretto rapporto di collaborazione fra il Laboratorio Luce e prestigiose aziende nazionali e internazionali, ha consentito di sviluppare rapporti professionali e di collaborazioni per ricerche ad alto contenuto innovativo. Di seguito un elenco sintetico dei principali progetti di ricerca finanziati, sviluppati e tutt'ora in corso, negli ultimi anni e gli altri soggetti coinvolti:

- 2012 – 2014 Nuovo sistema di illuminazione per utenze domestiche deboli: anziani, soggetti con mobilità ridotta e ipovedenti - Progetto ATP della Regione Lombardia, (*Design Group Italia – D'Alesio&Santoro – Light Contract FLOS*)
- 2011 – 2012 Advance LED lighting design nell'illuminazione pubblica, Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico (*ENEA, Univ. Sapienza, Univ. Studi di Milano, Neri*)
- 2011 Integrazione di Tecnologie SMART nel Lighting Design - Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico (*ENEA*)
- 2010 – 2011 Advance LED Lighting Design nell'Illuminazione Pubblica – Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico (*ENEA - Università di Milano - Università la Sapienza, Crosspoint*)
- 2010-2012 Nuovo sistema a LED per l'illuminazione delle strade urbane. Bando ATP risparmio energetico Regione Lombardia (*QLT - Archimede elettronica Srl, Gianazza Angelo SpA*)
- 2010 – 2012- Light+Energy+Information: Nuovi Territori Progettuali per il Network Pubblico – Progetto ATP della Regione Lombardia (*Artemide - Danese - Oxytech- Micromac - Almeco – Eliante*)
- 2010- Street Lamp – Lampade a LED (*Fraen*)
- 2009 – 2012 LED Advance Design nel ALADIN – INDUSTRIA 2015 National Research program (*Artemide*)
- 2009 – 2011 Verifiche prestazionali su prodotti di illuminazione LED (*QLT – Archimede*)
- 2009 – 2010 Lighting Design in Urban Spaces - Tecnologie per il risparmio elettrico nell'illuminazione pubblica (*ENEA - Università di Milano - Università la Sapienza – Oxytech*)
- 2009 Progetto OLA - LED nell'illuminazione stradale – Bando Legge 598/94 (*MAC - Fondazione Politecnico*)
- 2008 – 2009 Progetto Eco Light Design: promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali nel settore industriale (*ENEA - Università di Milano - Università la Sapienza - Oxytech - t:REDS*)
- 2007 – 2009 Luce Ambiente Uomo - Progetto Metadistretti della Regione Lombardia (*Politecnico di Milano - Artemide - Danese - Oxytech - DueElle – Micromac*)
- 2005 – 2008 Fisiolux (*Artemide*)

Milano, 7.9.12

Il ref. Scientifico

Prof. Maurizio Rossi