



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.3 Ricerca e Misure su sorgenti e prototipi

M. Rossi, D. Casciani, F. Musante



ADVANCE LED LIGHTING DESIGN NELL'ILLUMINAZIONE PUBBLICA:
RELAZIONE TECNICA ATTIVITA' C.3
RICERCHE E MISURE SU SORGENTI E PROTOTIPI

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 | 4 |
| Misure su sorgenti LED e Ottiche | 5 |
| Strumenti e modalità di misura | 10 |
| CQS..... | 13 |
| LER | 14 |
| Risultati Ottenuti..... | 16 |
| Comparazione di solidi fotometrici..... | 28 |
| Apparecchio ENEA PLUS SENSE..... | 30 |
| Misura apparecchio ENEA PLUS-ENEA PLUS SENSE | 31 |
| Rapporto di Rilievo apparecchio ENEA PLUS..... | 32 |
| Elaborazioni ENEA PLUS..... | 33 |
| Conclusioni | 37 |
| Allegati | 38 |

Sommario

Il report analizza dal punto di vista fotometrico e colorimetrico le performance di alcune sorgenti LED e sistemi ottici di diversi costruttori, al fine di ottenere dei dati affidabili per la successiva fase di progettazione del modulo ENEA PLUS ME per l'illuminazione urbana a traffico veicolare.

Le valutazioni fotometriche delle performance delle diverse soluzioni esaminate è stata effettuata sulla base dei confronti impiantistici, in una geometria tipo, avendo come riferimento i requisiti della categoria illuminotecnica ME3a.

Dal punto di vista della caratterizzazione colorimetrica, per ciascuna sorgente LED o complesso LED+Ottica, a seconda dei casi, è stata determinata la temperatura di colore (CCT), il valore di alcuni indici di resa cromatica CRI e CQS e il legame tra questi parametri di "qualità" della luce con l'efficacia del sistema analizzato (espressa in termini di LER).

Per quanto riguarda la misura sui prototipi, sono state esaminate le performance fotometriche del modulo ENEA PLUS SENSE, in corso di prototipazione: l'apparecchio condivide il sistema ottico modulare con la precedente realizzazione ENEA PLUS, di cui risulta una naturale evoluzione ed esempio di applicazione delle nuove tecnologie "smart".

Il report si sofferma ad analizzare la differenza nella distribuzione fotometrica tra i moduli equipaggiati con le vecchie lenti e quelli aggiornati (sistema di fissaggio della lente al MCPCB) con il nuovo modello di lenti di cui è stato necessario ripetere la caratterizzazione fotometrica.

Le fotometrie ottenute da ciascuno dei due moduli, sono state combinate tra loro, ottenendo i corrispondenti file fotometrici *.LDT e *.IES al fine di realizzare tutte le possibili configurazioni del prodotto ENEA PLUS.

A tale scopo è stata implementato un "indice di similitudine" tra due fotometrie, definito in letteratura, che viene abitualmente utilizzato per comparare le performance di diversi sistemi di misura che caratterizzano lo stesso dispositivo.

Misure su sorgenti LED e Ottiche

Lo scopo di questa attività risulta quello di ottenere i dati fotometrici necessari allo sviluppo della fase di progettazione del modulo LED adatto ad illuminare strade a traffico veicolare (categoria ME).

Le misure sono state condotte essenzialmente su sistemi ottici maggiormente diffusi sul mercato, scelti in accordo con i risultati e le considerazioni iniziali di progetto svolte nell'attività C2.

I dispositivi misurati sono:

- Kathod Nactus KNAC4801A 48 LEDs
- TLED_SL ST 01 (2 +2 LEDs)
- LEDIL C12360 STRADA 2x2 DNW
- LEDIL C12362 STRADA 2x2 DWC
- LEDIL C12419 STRADA 2x2 A-T

Per quanto riguarda i sistemi ottici LEDIL, il LED considerato è il CREE XM-L alimentato alla corrente di 1.2 A, come nel progetto del modulo.

Per la realizzazione della misura è stato utilizzato un metal core PCB disponendo i LEDs ad una interdistanza di 25.4 mm nelle due direzioni, come mostrato nella Figura 1.

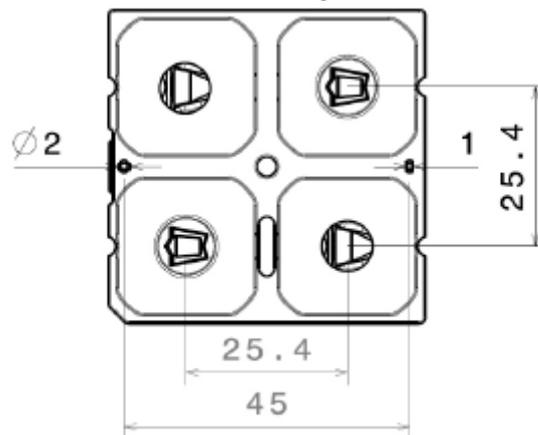


Figura 1 Interrasse tra i LED per le lenti LEDIL STRADA 2x2

Il MCPCB è stato quindi fissato a un dissipatore commerciale a bassa resistenza termica, interponendo un foglio di materiale termoconduttivo (Berquist Sil-Pad 1500 ST) come interfaccia termica. Il fissaggio del PCB al dissipatore e la necessaria pressione di contatto è stata garantita da 4 viti autofilettanti, mentre il fissaggio delle lenti è avvenuto sfruttando le proprietà autocentranti del modulo e assicurandone il fissaggio con la vite centrale.

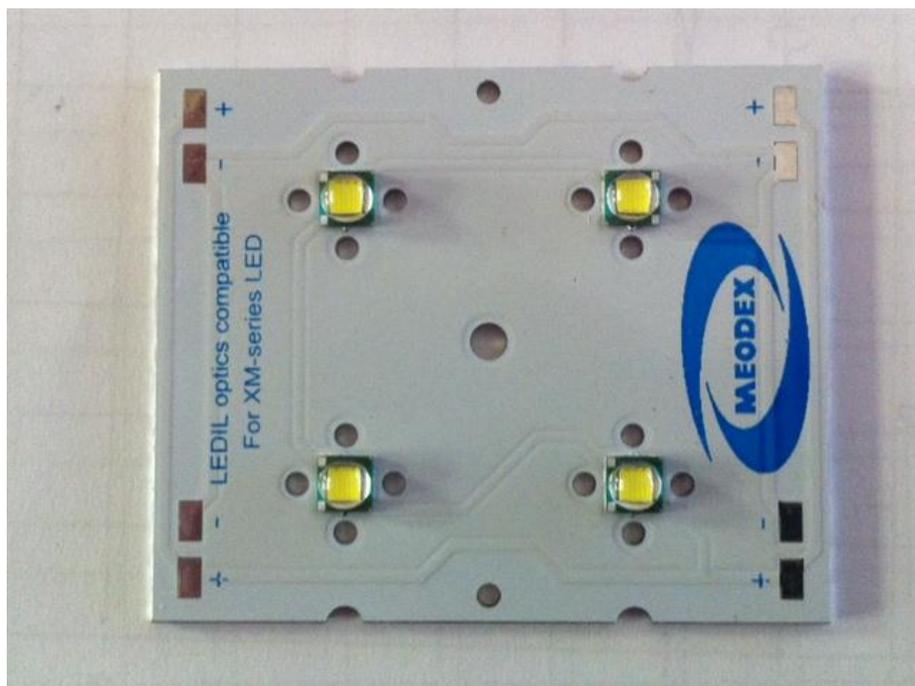


Figura 2 MCPCB utilizzato per il test delle lenti LEDIL Strada 2x2

Il dissipatore utilizzato per le prove (dimensioni 200x150 mm con 20 alette di altezza 30 mm ciascuna) presenta una resistenza termica pari a 0.48 °C/W, in modo tale che l'emissione dei LED fosse il più possibile costante durante le prove delle diverse lenti.



Figura 3 Dissipatore utilizzato per le prove dei moduli LEDIL Strada 2x2 e relativa interfaccia termica

Le caratteristiche dell'interfaccia termica sono sintetizzate alla Figura 4: il valore di interesse è la conduttività termica pari a 1.8 W/Km.

| TYPICAL PROPERTIES OF SIL-PAD 1500ST | | | | | | |
|---|------------------|------------------|-------------|------|------|------|
| PROPERTY | IMPERIAL VALUE | METRIC VALUE | TEST METHOD | | | |
| Color | Blue | Blue | Visual | | | |
| Reinforcement Carrier | Fiberglass | Fiberglass | — | | | |
| Thickness (inch) / (mm) | 0.008 | 0.203 | ASTM D374 | | | |
| Hardness (Shore A) | 75 | 75 | ASTM D2240 | | | |
| Breaking Strength (lbs/inch) / (kN/m) | 1.9 | 0.34 | ASTM D1458 | | | |
| Elongation (%45° to Warp and Fill) | 22 | 22 | ASTM D412 | | | |
| Tensile Strength (psi) / (MPa) | 238 | 1.6 | ASTM D412 | | | |
| Continuous Use Temp (°F) / (°C) | -76 to 356 | -60 to 180 | — | | | |
| ELECTRICAL | | | | | | |
| Dielectric Breakdown Voltage (Vac) | 3000 | 3000 | ASTM D149 | | | |
| Dielectric Constant (1000 Hz) | 6.1 | 6.1 | ASTM D150 | | | |
| Volume Resistivity (Ohm-meter) | 10 ¹¹ | 10 ¹¹ | ASTM D257 | | | |
| Flame Rating | V-O | V-O | U.L. 94 | | | |
| THERMAL | | | | | | |
| Thermal Conductivity (W/m-K) | 1.8 | 1.8 | ASTM D5470 | | | |
| THERMAL PERFORMANCE vs PRESSURE | | | | | | |
| | Pressure (psi) | 10 | 25 | 50 | 100 | 200 |
| TO-220 Thermal Performance (°C/W) | | 1.54 | 1.52 | 1.51 | 1.49 | 1.46 |
| Thermal Impedance (°C-in ² /W) (I) | | 0.37 | 0.28 | 0.23 | 0.21 | 0.20 |
| 1) The ASTM D5470 (Bergquist modified) test fixture was used. The recorded value includes interfacial thermal resistance. These values are provided for reference only. Actual application performance is directly related to the surface roughness, flatness and pressure applied. | | | | | | |

Figura 4 Caratteristiche elettriche- meccaniche e termiche dell'interfaccia termica impiegata nei test

Per quanto riguarda il modulo NACTUS, il LED utilizzato per i rilievi è il LUMILEDS REBEL ES ANSI LXML-PWC1-0100 V0 C: il sistema sottoposto a test risulta composto da un MCPCB, che ospita i 48 LEDs e da un dissipatore in materiale plastico termoconduttivo appositamente realizzato.

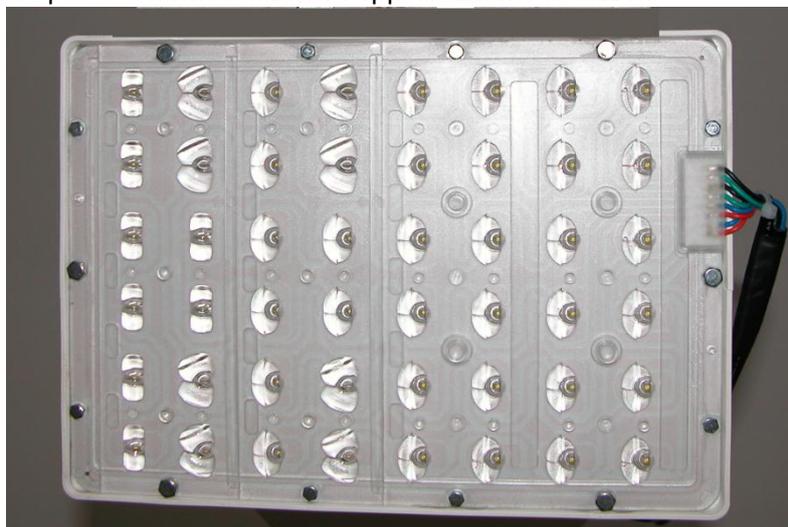


Figura 5 Sistema ottico NACTUS 48 LEDs

La disponibilità di questo campione, ha consentito di valutare l'efficacia di questo tipo di materiali in alternativa all'alluminio, in quei casi in cui il peso dell'apparecchio risulta un fattore determinante di scelta. Questa soluzione non risulta adatta a quei casi in cui l'efficienza dell'apparecchio debba rappresentare la principale caratteristica del prodotto (come nel caso dell'attività C2 dell'allegato tecnico), tuttavia i risultati di misura possono essere comunque utilizzati per una valutazione della distribuzione fotometrica del sistema ottico esaminato.

Il modulo esaminato, sebbene sia indicato dal produttore dell'ottica come adatto a raggiungere i requisiti della categoria illuminotecnica ME3a, a causa del particolare sistema di dissipazione che non permette

elevati valori di corrente di alimentazione, risulta adatto per le categorie illuminotecniche CE5- S3-ME5-ME6.

I principali requisiti per i materiali plastici termo-conduttivi possono essere sintetizzati nelle seguenti caratteristiche :

- La conducibilità termica deve essere considerevolmente più elevata rispetto a quelli medi della plastica (per i polimeri la conducibilità termica oscilla tra 0.1 W/m-K e 0.3 W/m-K, e risulta sensibilmente inferiore a quella tipica dei metalli che supera 100 W/m-K)
- Il materiale (compound termo-conduttivo) deve poter essere facilmente formato mediante tecnica di stampaggio a iniezione senza l'impiego di attrezzature dedicate
- La prestazioni meccaniche e la resistenza agli urti devono essere adeguate a garantire il funzionamento del prodotto senza rotture per usura o per cadute o urti
- Il materiale deve possedere una elevata stabilità dimensionale, in modo da evitare problemi nelle fase di assemblaggio con altri componenti realizzati con altre tecnologie
- Il comportamento termico deve essere "soddisfacente" fino a 100°C
- Il materiale deve risultare resistente agli agenti chimici e al vapore in modo che non si producano fratture da tensione nei pezzi stampati
- La dilatazione termica del materiale deve essere comparabile a quella dei metalli (si evitano rotture e problemi di assemblaggio)

La creazione di un compound termo-conduttivo prevede la miscelazione di una resina polimerica (PA12) e una carica senza incorrere in una separazione tra la matrice e le cariche aggiunte (si vuole evitare il più possibile la formazione di polvere, grumi e particelle non trattabili).

Differenti sono le cariche che possono essere aggiunte alla resina per migliorarne le proprietà termo-conduttive, ma occorre fare attenzione affinché il miglioramento di quest'ultime non comporti un peggioramento della stabilità dimensionale e la creazione di una anisotropia locale delle fibre e conseguentemente delle proprietà meccaniche, innescando un ritiro differenziale durante la fase di raffreddamento del materiale nello stampo, con la formazione di manufatti deformati o in tensione.

La soluzione adottata dal produttore esaminato (LATI) è stata ottenuta utilizzando una carica che fosse un mix di ceramiche conduttive, ossidi di metallo differenti.

Durante il processo di estrusione le particelle conduttive sono disperse all'interno del materiale e con l'aumentare del numero di contatti tra particelle conduttive, si registra un forte aumento della conduzione termica del materiale, come illustrato Figura 6.

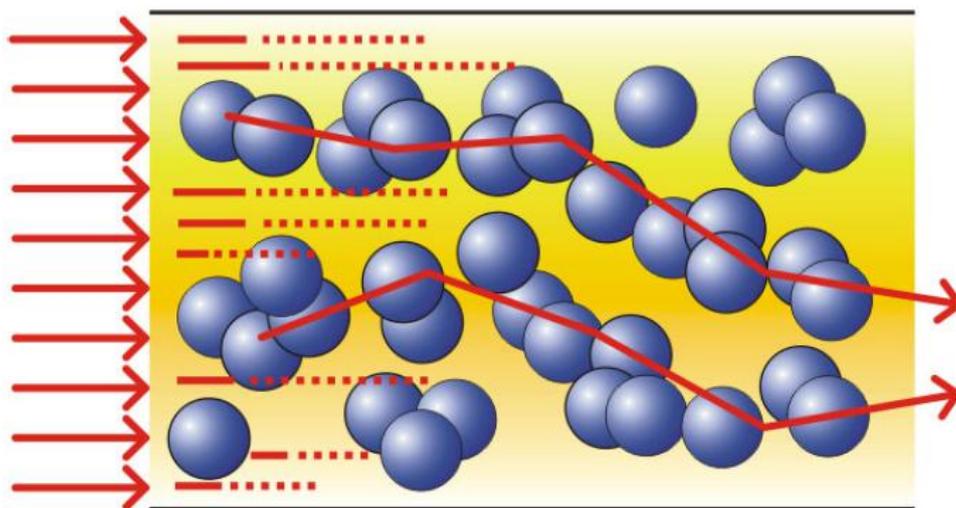


Figura 6 Il calore è parzialmente disperso nella matrice del polimero e parzialmente trasmesso attraverso la carica additivata

Le dimensioni del dissipatore sono 260x190x40 in cui la superficie di scambio è rappresentata da una serie di alette a sezione trapezoidale di altezza 15 mm, spessore 2.50 mm e interasse tra i punti medi pari a 12 mm.

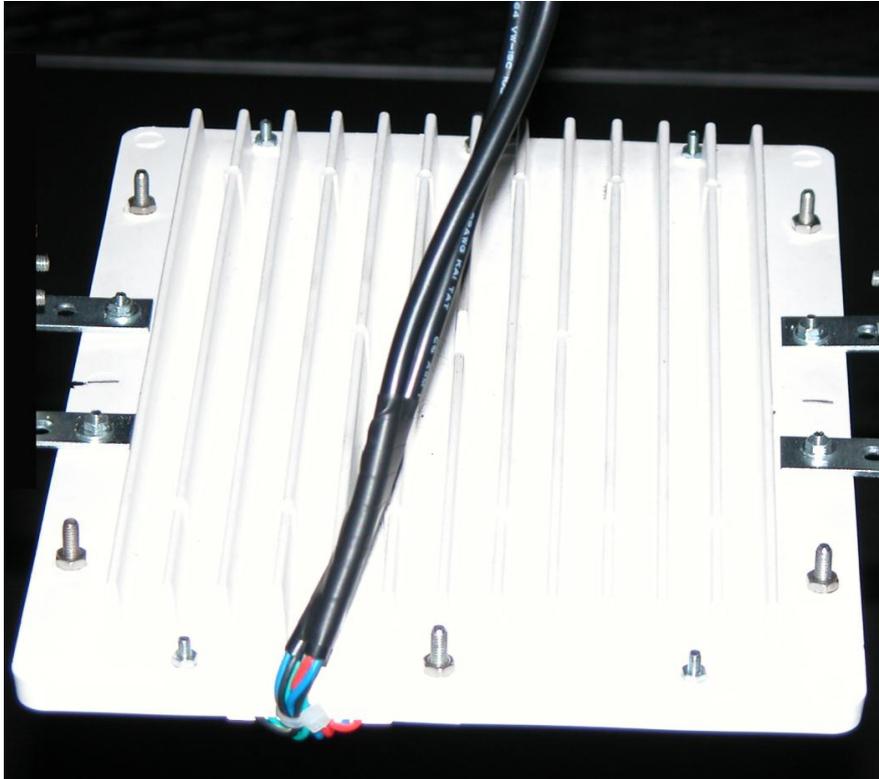


Figura 7 Sistema ottico NACTUS (Lato dissipatore in materiale plastico termoconduttivo)

Per quanto riguarda il sistema ottico T-LED (Figura 8), i led utilizzati sono gli CREE XT-E montati su un metal core PCB, fissato tramite interfaccia termoconduttiva a un dissipatore commerciale a bassa resistenza termica. Il dissipatore e l'interfaccia termica sono gli stessi utilizzati per le prove sulle lenti LEDIL.

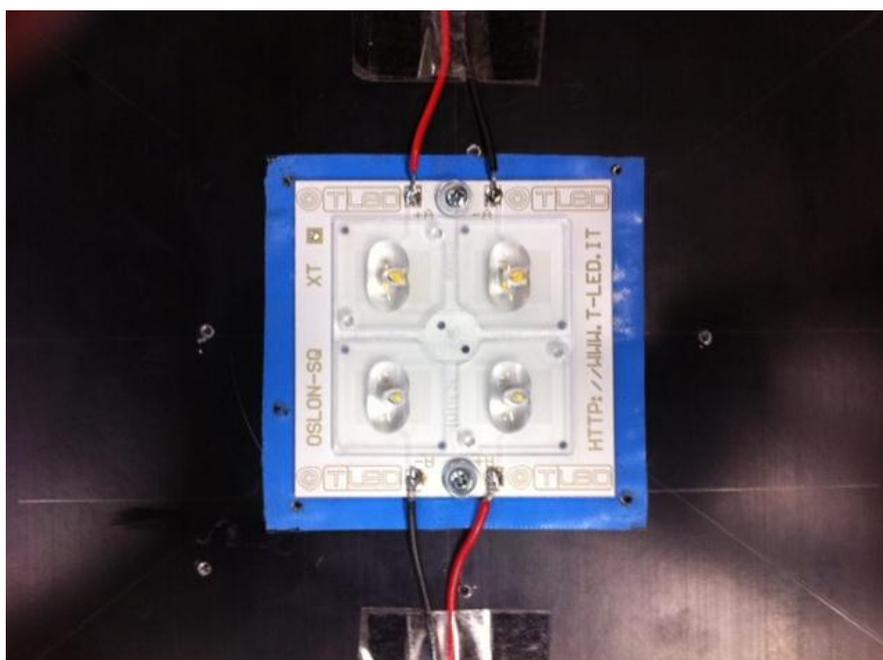


Figura 8 Sistema ottico TLED completo di dissipatore e interfaccia termica misurato

Strumenti e modalità di misura

Le misure effettuate sono riguardano la distribuzione fotometrica delle diverse lenti e la distribuzione spettrale nella banda del visibile tra 380-780.

La misura fotometrica è stata eseguita con goniometro a specchio in accordo alla norma EN 13032 e Raccomandazione CIE 121. Il rilievo è stato eseguito in modalità continua esplorando il solido fotometrico secondo il sistema di riferimento CIE C- γ con passo angolare di 1° per l'angolo γ e di 10° per i piani C.

Prima di essere sottoposti a misurazione i dispositivi devono aver raggiunto l'equilibrio termico; il prodotto è considerato stabile quando ogni 3 letture fotometriche e della potenza elettrica, eseguite in 30 minuti a distanza di 15 minuti, non si verificano variazioni maggiori dell'1% delle grandezze esaminate.

I campioni dotati di un sistema di alimentazione dedicato (prototipo Khatod NACTUS) sono stati alimentati alla tensione di $230\text{ V} \pm 0.1\%$ con frequenza di alimentazione pari a $50\text{ Hz} \pm 0.1\%$ e distorsione armonica inferiore a 0.5% (Elettrotest model TPS/M 6000).

Per i prototipo Khatod NACTUS, la corrente di pilotaggio dei LED risulta pari a 550 mA.

I dispositivi privi di un proprio sistema di alimentazione sono stati alimentati mediante un alimentatore in corrente continua, a corrente costante (ISOTECH), le cui caratteristiche tecniche sono le seguenti:

- Tensione di uscita 0-40 V CC (risoluzione 10 mV)
- Corrente di uscita 0-5 A (risoluzione in 2 mA)
- Regolazione tensione carico $\leq 10\text{ mV}$
- Regolazione corrente carico $\leq 5\text{ mA}$
- Regolazione tensione linea $\leq 0.05\%$
- Regolazione corrente linea $\leq 0.05\%$
- Tensione ondulazione $\leq 20\text{ mV rms}$

In questo caso i valori di corrente imposta ai led, sono stati fatti variare in accordo al tipo di dispositivo in esame:

- 350 mA - 550 mA per ottica T_LED (applicati a ciascuno dei due rami del circuito)
- 1200 mA per ottiche LEDIL (applicate alla serie dei 4 LED)

Le grandezze elettriche sono state monitorate durante il rilievo, attraverso la misura di tensione, corrente, potenza e frequenza al termine dell'esplorazione di ciascun semipiano C (YOKOGAWA WT 230).

Le misure spettrali sono state effettuate andando a valutare il flusso radiante spettrale emesso dall'apparecchio posto all'interno di una sfera integratrice del diametro di 2 m (Figura 9).



Figura 9 Montaggio apparecchio all'interno della sfera integratrice per la misura spettrale

Lo spettro-radiometro utilizzato è il Photoresearch Spectra Scan PR 701s, munito di adattatore CR-55 per la misura della irradianza spettrale; le caratteristiche tecniche dello strumento sono riassunte alla Tabella 1.

Tabella 1 Caratteristiche dello strumento utilizzato per il rilievo

| | |
|---|---|
| Wavelength | 380-780 nm |
| Apertura | 1/2° |
| Luminance Accuracy | ±2% riferito al NIST con illuminante standard a 2856 Kelvin |
| Luminance Precision | La deviazione standard di misure ripetute su un periodo di 30 minuti, è minore del 0.1% quando lo strumento funziona nelle normali condizioni operative |
| Accuratezza Colorimetrica per illuminante CIE A | CIE 1931 $x \pm 0.015$ $y \pm 0.01$ |
| Color Precision | ±.005 per CIE 1931 x,y misurando l'illuminante A della CIE |
| Errore Polarizzazione | >=5% quando si misurano sorgenti 100% polarizzate linearmente |
| Risoluzione Digitale | 65535:1 (16 bits) |
| Tempo integrazione | Da 25 ms a 60000 ms |

Per l'ottica Khatod Nactus, la prova è stata condotta alla tensione nominale di alimentazione del dispositivo 230V ±0.1% in condizioni di raggiunto regime termico¹.

Tutte le misure spettrali sono state condotte dopo un riscaldamento iniziale del dispositivo in prova pari a 45 minuti.

Per la misure del PCB utilizzato per le ottiche LEDIL e per il sistema ottico T-LED è stato utilizzato uno spettro radiometro portatile di produzione Minolta (CL 500), le cui caratteristiche sono riassunte alla Tabella 2. Anche in questo caso le misure sono state eseguite all'interno delle sfera integratrice di 2 m di diametro, dopo il raggiungimento dell'equilibrio termico del dispositivo (Figura 10).

¹ Il prototipo provato disponeva di un proprio sistema di alimentazione

Tabella 2 Caratteristiche dello strumento Minolta CL 500 (caratteristiche dichiarate del costruttore)

| | |
|---|---|
| Modello | Spettrofotometro per misure di illuminamento e irradianza spettrale MINOLTA CL-500A |
| Classe Illuminamento | Conforme alle disposizioni relative alla classe AA di JIS C 1609-1: 2006 "illuminante meters" Parte 1: Generalità strumenti di misura" * 1 Conforme alla DIN 5032 Classe B Parte 7 |
| Range lunghezza d'onda | 360 ~ 780 nm |
| Uscita Passo lunghezza d'onda | 1 nm |
| Passo lunghezza d'onda | Approx. 10 nm (half bandwidth) |
| Accuratezza lunghezza d'onda | ±0.3 nm (Median wavelengths of 435.8 nm, 546.1 nm, and 585.3 nm ² as specified in JIS Z 8724) ³ |
| Range di Misura | 0.1 to 100,000 lx (chromaticity display requires 5 lx or more) |
| Accuratezza (Standard Illuminante A) | E _v (Illuminance) : ±2%±1 digit of displayed value xy: ±0.0015 (10 to 100,000 lx) xy: ±0.002 (5 to 10 lx) |
| Ripetibilità (2σ) (Standard Illuminante A) | E _v : 0.5% + 1digit XY: 0.0005 (500~100,000lx) xy: 0.001 (100~500lx) xy: 0.002 (30~100lx) xy: 0.004 (5 ~ 30 lx) |
| Risposta spettrale relativa nella regione del visibile, caratteristica (f1') | <=1.5% of spectral luminous efficiency V (λ) |
| Correzione al coseno (f2) | E _v : Entro 3% |
| Deriva Termica (fT) | E _v : ±3% of displayed value; xy: ±0.003 |
| Deriva Umidità (fH) | E _v : ±3% of displayed value; xy: ±0.003 |
| Tempo di Misura | Super Fast mode: Approx. 0.2 sec. (quando collegato al computer); Fast mode: Approx. 0.5 sec.; Slow mode: Approx. 2.5 sec.; Automatic exposure time setting (high accuracy) mode: Approx. 0.5 to 27 sec. |



Figura 10 Montaggio del dissipatore commerciale all'interno della sfera integratrice. Questa soluzione consente il rapido montaggio di sistemi ottici di diversi costruttori all'interno della sfera per la loro misura colorimetrica

Durante la misura alla sfera il sistema ottico T-LED e il MCPCB specifico per le lenti LEDIL sono stati alimentati con il medesimo sistema di alimentazione utilizzato per la misura fotometrica.

Si osserva che la posizione di misura nella sfera differisce da quella prevista per il normale funzionamento del dispositivo, tuttavia l'impiego di un dissipatore sovradimensionato per la potenza termica in gioco e la dimensione della sfera (non influenza in modo significativo i moti convettivi sulle alette del dissipatore), rendono l'errore di misura trascurabile ai nostri fini².

CQS

Il Color Quality Scale (CQS) sviluppato dal NIST è un indice di valutazione della resa cromatica di sorgenti tradizionali e LED, che cerca di superare le limitazioni del CRI rispetto alle sorgenti allo stato solido³.

Le principali modifiche riguardano il set di campioni con altri estratti MCCs (Macbeth Colour Checker Chart) che risultano maggiormente saturi, perché si è osservato che una sorgente può comportarsi meglio con colori non saturati e peggio con colori saturi (ma non è stato provato il viceversa). Lo spazio colore è stato aggiornato CIELab e la trasformazione di adattamento cromatico CMCCAT2. L'indice non penalizza l'aumento di saturazione dei campioni cromatici rispetto alla sorgente di riferimento, la media delle differenze cromatiche è stata sostituita dal valore quadratico medio, in modo tale che i le resa povera di uno o due campioni avessero un impatto sul valore dell'indice. L'indice è stato costruito in modo tale da evitare valori negativi e la sua variazione è tra 0 e 100; la non linearità introdotta influisce solo per i valori dell'indice minori di 30 in modo che i valori più non siano modificati preservando la linearità della scala. Il meccanismo di selezione dell'illuminante di riferimento è rimasto invariato, ma è stato introdotto un fattore di correzione del valore dell'indice che penalizza le sorgenti con una temperatura di colore estremamente bassa, e quindi una gamut area molto piccola e sono capaci di rendere un numero limitato di colori. Accanto a questa metrica CQS_a, due altri indici sono stati sviluppati per fornire informazioni

² Lo scopo di queste misure è quello di ricavare dei dati di riferimento per la temperatura di correlata di colore e per l'indice di resa cromatica dei prototipi di sistemi ottici analizzati.

³ W. Davis, and Y. Ohno, "Color quality scale", Opt. Eng. 49(3), 033602 (2010).

specifiche sulle proprietà di resa del colore delle sorgenti, CQS_f , color fidelity scale che penalizza gli incrementi di saturazione (la sorgente di test deve riprodurre il campione cromatico con la massima fedeltà rispetto all'illuminante di riferimento) e il CQS_p , il "color preference scale" che ricompensa gli incrementi di saturazione nella resa dei campioni cromatici.

LER

L'indice LER (Luminous Efficacy of Optical Radiation) rappresenta la potenza ottica relativa dello spettro di emissione utile alla visione comparata con la potenza ottica totale emessa, come indicato dalla seguente relazione:

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

Quando si considera spettri di sorgenti luminose per illuminazione generale, un altro importante aspetto da considerare è l'efficacia della radiazione luminosa (in seguito indicato come LER, lumen per watt lm/W), che è il fattore di conversione dalla potenza ottica (Watt) al flusso luminoso (lumen) ed è determinato esclusivamente dallo spettro della sorgente esaminata.

Il legame tra LER e CRI e tra LER e CCT è molto discusso nella letteratura scientifica e risulta determinante per la scelta delle caratteristiche del LED da utilizzare per la progettazione del modulo PLUS ME4.

Occorre infatti considerare diversi aspetti che coinvolgono la scelta del LED:

1. L'attuale versione della norma UNI 11248 consente la riduzione di una categoria illuminotecnica se l'impianto impiega sorgenti a luce bianca, con indice di resa cromatica maggiore di 65.
2. Alcune famiglie di LED (es COB e LED Array) vengono utilizzati sia in applicazioni di esterni sia di interni in cui il valore minimo dell'indice di resa cromatica è pari a 80 : solo alcuni costruttori hanno a catalogo prodotti con indice di resa cromatica inferiore (65 o 70) , oppure hanno particolari selezioni adatte ad applicazioni outdoor (in cui però l'intervallo di temperatura di colore è molto ampio)
3. La temperatura di colore delle sorgenti non è un parametro libero di progetto: si stanno facendo strada delle proposte normative di limitare tale valore a 3500 K

Attraverso un programma di simulazione , alcuni autori⁵ hanno simulato diversi spettri di emissione di sorgenti LED bianche in modo che avessero $CRI > 80$, $LER > 300$ lm/W e temperatura correlata di colore compresa tra 1500 K e 4000 K. Ciascuno spettro è stato modellato come una somma di funzioni gaussiane. Gli intervalli di lunghezza d'onda scelti per la definizione di ciascun colore primario, esplorate con un passo di 10 nm di risoluzione sono stati i seguenti: tra **450** nm e **490** nm per il blu, tra i **500** nm e **540** nm per il verde, tra **550** nm e **590** nm per il giallo, e tra **600** nm e **640** nm per il rosso. Anche le ampiezze delle varie componenti spettrali sono variate durante il processo di generazione.

Considerando tutte le differenti possibili combinazioni di ciascuna componente cromatica, sono stati generati 237,109,375 possibili emissioni spettrali, che sono state caratterizzate successivamente in termini di LER, CRI, CCT.

⁴ Questo tema ha destato nuovo interesse a causa delle recenti proposte di introdurre un limite al valore della CCT (≤ 3500) per le sorgenti allo stato solido destinate all'illuminazione urbana.

⁵ Talha Erdem, Sedat Nizamoglu, Xiao Wei Sun and Hilmi Volkan Demir, «A photometric investigation of ultra-efficient LEDs with high color rendering index and high luminous efficacy employing nanocrystal quantum dot luminophores», 4 January 2010 / Vol. 18, No. 1 / OPTICS EXPRESS 340

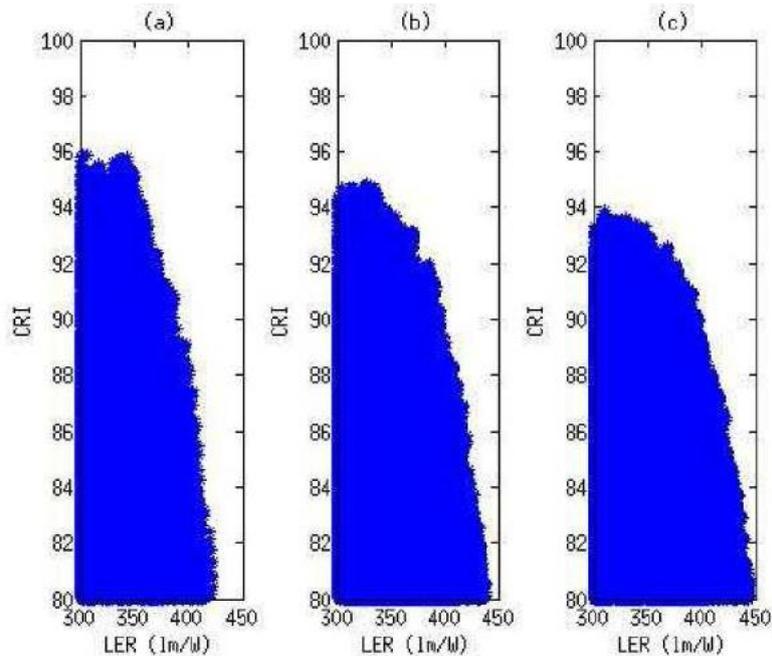


Figura 11 Dipendenza del CRI dal LER per tre intervalli di temperatura correlata di colore: a) 2450K<CCT<2550 K, b) 2950K <CCT<3050 K,c) 3450K<CCT<3550 K

Dall'esame della Figura 11 dei dati ottenuti, si osserva il legame tra LER e l'indice di resa cromatica CRI per 3 intervalli di CCT :la prima conclusione è che le performance dei sistemi simulati in termini di resa cromatica (CRI), devono essere sacrificate se si desidera ottenere una elevata efficacia (LER).

Inoltre che il valore massimo teorico del CRI diminuisce al crescere della CCT (si passa da 96 per il primo gruppo di temperature correlata di colore a meno di 94 per il terzo).

Se si opera un filtraggio sugli spettri generati, andando a considerare solo quelli per cui CRI>80, 2500<CCT<4000 K e LER>300 lm/W, si osserva che rimangono disponibili solo 2% del totale degli spettri generati.

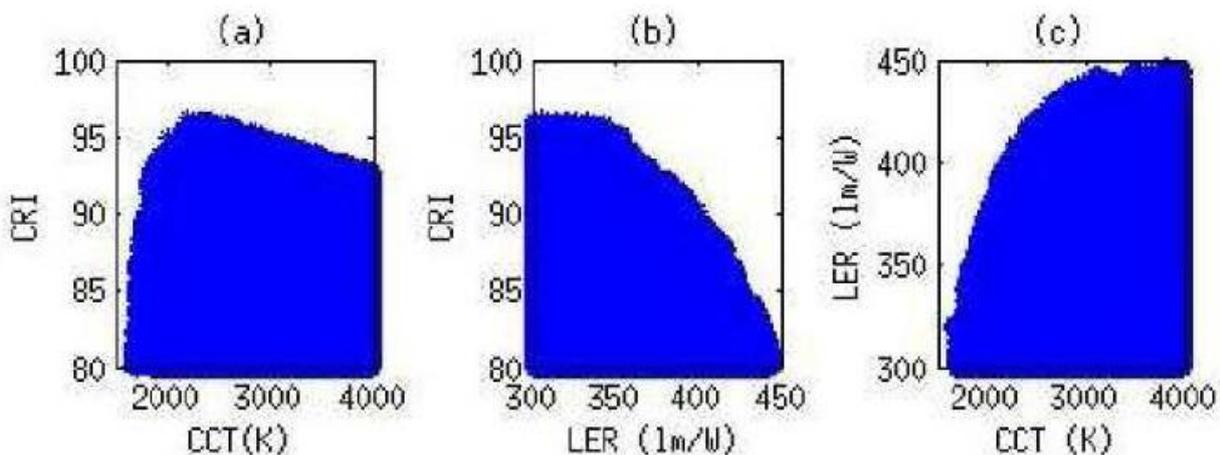


Figura 12 Relazione tra CCT e CRI in a), tra CRI e LER in b) e tra CCT e LER in c) per gli spettri selezionati secondo il criterio riportato nel testo

Dall'esame della Figura 12, possono dedurre le seguenti conclusioni:

- a) il valore del CRI massimo teorico cresce tra 1500 K e 2200 K, dopo tale valore inizia a diminuire.
- b) il valore massimo teorico del CRI non cambia significativamente tra 300 e 330 lm/W, tuttavia per valori elevati del LER (>350 lm/W), il valore del CRI massimo teorico diminuisce.
- c) L'aumento del LER richiede l'aumento della CCT

Risultati Ottenuti

A causa delle differenti condizioni di funzionamento dei diversi dispositivi esaminati, per l'elaborazione dei dati si è proceduto come segue:

- Per i sistemi ottici LEDIL (utilizzati nel progetto del modulo di cui al punto C2 dell'allegato tecnico) sono stati valutati i rendimenti di ciascun modulo attraverso il rapporto tra il flusso luminoso emesso dal sistema completo e del solo LED. Per la fotometria C12360 2x2 DWN⁶ è stato determinato il valore minimo del flusso emesso dal sistema ottico per il raggiungimento dei requisiti della categoria illuminotecnica ME3a.
- Per quanto riguarda il sistema ottico Khatod Nactus, a causa del particolare sistema di dissipazione adottato (plastico termoconduttivo) è stata valutata la rispondenza ai requisiti della classe ME3a rispetto ai parametri di uniformità generale, longitudinale e SR e di abbagliamento andando a ricercare il valore minimo di flusso emesso dall'apparecchio che consentano il soddisfacimento di tali requisiti. Sulla base di tale informazione, tenuto conto del modello di LED utilizzato e della sua temperatura correlata di colore, sarà possibile determinare la corrente di alimentazione e la temperatura di giunzione (determinate dal sistema di dissipazione) necessarie al raggiungimento di tale obiettivo (in questo caso il numero di LED è fissato). In questo caso non è stato possibile determinare il rendimento del sistema ottico che risultava sigillato al dissipatore mediante collante.
- Per il sistema ottico T_LED verrà valutata la rispondenza ai requisiti della classe ME3a rispetto ai parametri di uniformità generale, longitudinale e SR e di abbagliamento andando a ricercare il valore minimo di flusso emesso dall'apparecchio che consenta il soddisfacimento di tali requisiti. Non è stato possibile determinare il valore del rendimento in quanto il sistema ottico risultava solidamente fissato al MCPCB.

L'impianto tipo utilizzato per le verifiche, risponde ai requisiti minimi di interdistanza fissati da molte leggi regionali per la riduzione dell'inquinamento luminoso e per il miglioramento del risparmio energetico nella pubblica illuminazione:

- Disposizione dei centri unilaterale
- Rapporto altezza (H) su larghezza dalla carreggiata (L) pari a 1 (L=8m)
- Inclinazione rispetto all'orizzontale:0°
- Sporgenza dei centri sulla carreggiata compresa tra 0 e 1.2 m
- Manto stradale C2 con Q0=0.07
- Fattore di manutenzione 0.8

Sono stati analizzati 3 sistemi ottici di produzione LEDIL:

- C12360 2x2 DWN
- C12419 2x2 AT
- C12362 2x2 DWC

⁶ Per maggiori dettagli, si veda la relazione del punto C2 dell'allegato tecnico.



Figura 13 Sistemi ottici LEDIL misurati

Per ciascuno di essi è stato determinato il rendimento come rapporto tra il flusso emesso dal sistema completo (LEDs+lenti) e quello emesso dai soli LEDs.

Nelle condizioni di test descritte al paragrafo precedente, il flusso luminoso emesso dai soli LED risulta pari a 1706 lm alla corrente di 1200 mA. I rendimenti per i tre gruppi di lenti esaminati sono riportati alla Tabella 3.

Tabella 3 Valori di rendimento determinati per ciascun modello di lente

| Modello | Flusso complessivo LED (lm) @ 1200 mA | Flusso emesso dalla lente (lm) @ 1200 mA | η (%) |
|---------|---------------------------------------|--|------------|
| C12360 | 1706 | 1603 | 94% |
| C12419 | 1706 | 1587 | 93% |
| C12362 | 1706 | 1569 | 92% |

Le indicatrici di emissione nei i piani principali C0-180° e C90-270° delle diverse lenti sono riportate nelle figure seguenti (Figura 14, Figura 15, Figura 16).

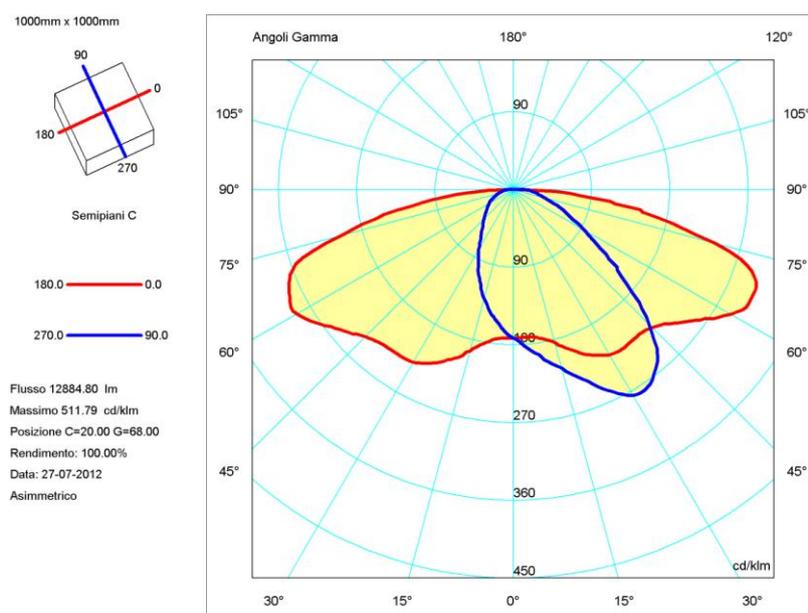


Figura 14 Indicatrici di emissione nei piani C0-180° lente LEDIL Strada C 12360 2x2 DWN

Considerando la fotometria C12360, il flusso minimo per il raggiungimento dei requisiti previsti dalla categoria illuminotecnica ME3a, risulta pari a 9318 lm, emessi dal sistema ottico LED+Lenti: in questa situazione i risultati impiantisti sono riportati alla Figura 17.

Si osserva che il sistema non soddisfa i requisiti della classe per la limitazione dell'abbagliamento: il sistema di dissipazione o qualche altro componente dovrà provvedere a realizzare un'ideale schermatura per rientrare nei limiti previsti.

Il flusso luminoso emesso da ciascun LED dovrebbe quindi essere pari a 308 lm, considerando un apparecchio composto da 8 moduli con 4 LEDs per ciascuno. Il sistema non tiene conto della presenza di uno schermo trasparente che garantisca il necessario grado di protezione contro l'ingresso di polvere e liquidi.

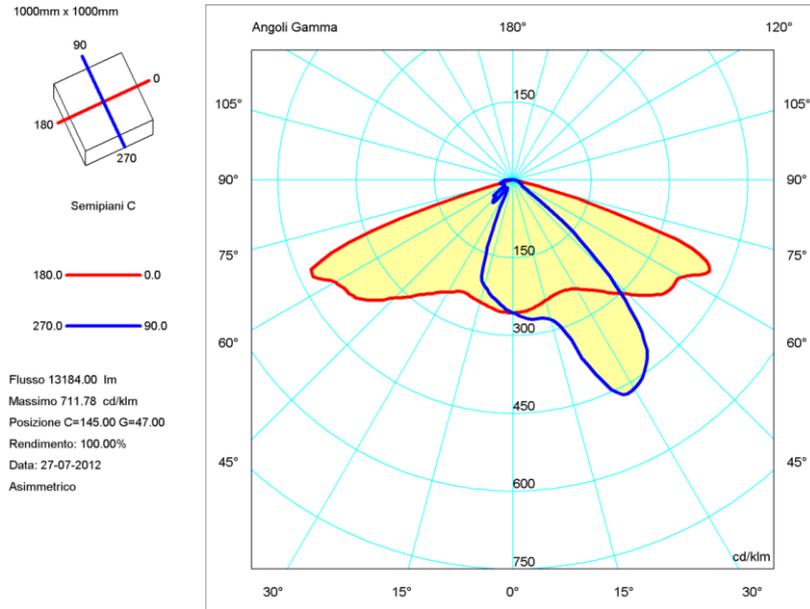


Figura 15 Indicatrici di emissione nei piani C0-180° lente LEDIL Strada C12419 2x2 A-T

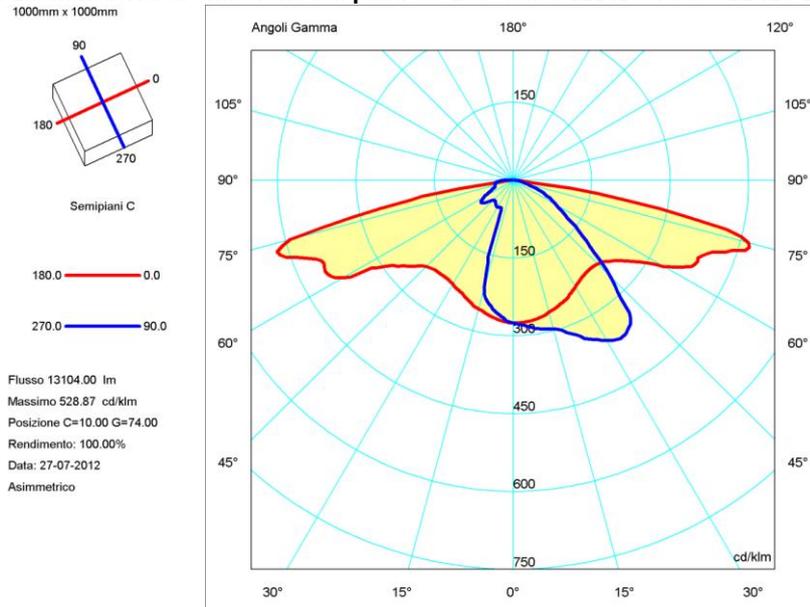
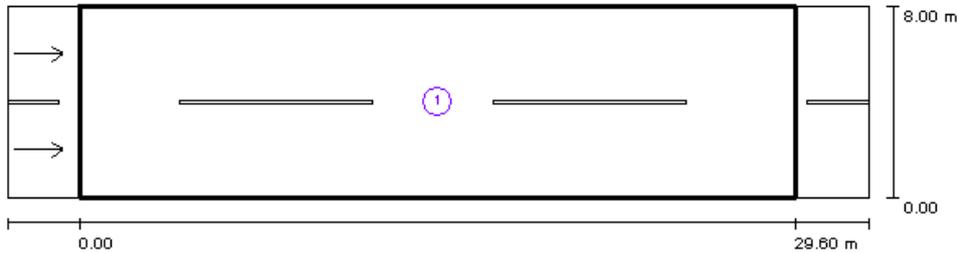


Figura 16 Indicatrici di emissione nei piani C0-180° lente LEDIL Strada C 12362 2x2 DWC

Strada 1 / Risultati illuminotecnici



Fattore di manutenzione: 0.80

Scala 1:255

Lista campo di valutazione

- 1 Campo di valutazione Carreggiata 1
Lunghezza: 29.600 m, Larghezza: 8.000 m
Reticolo: 10 x 6 Punti
Elementi stradali corrispondenti: Carreggiata 1.
Manto stradale: C2, q0: 0.070
Classe di illuminazione selezionata: ME3a

(Non tutti i requisiti fotometrici sono rispettati.)

| | L_m [cd/m ²] | U0 | UI | TI [%] | SR |
|------------------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Valori reali calcolati: | 1.00 | 0.46 | 0.72 | 17 | 0.58 |
| Valori nominali secondo la classe: | ≥ 1.00 | ≥ 0.40 | ≥ 0.70 | ≤ 15 | ≥ 0.50 |
| Rispettato/non rispettato: | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ |

Figura 17 Risultati impiantistici per la lente LEDIL C12360 2x2 DWN, con un flusso luminoso emesso dal sistema pari a 9318 lm.

Le curve isolux sono state determinate moltiplicando il flusso luminoso per 8, in modo da simulare la presenza di 4 moduli con 8 LEDs per ciascun modulo (soluzione sviluppata nel punto C2 dell'allegato tecnico) e successivamente ponendo l'apparecchio a 8 m di altezza sulla carreggiata.

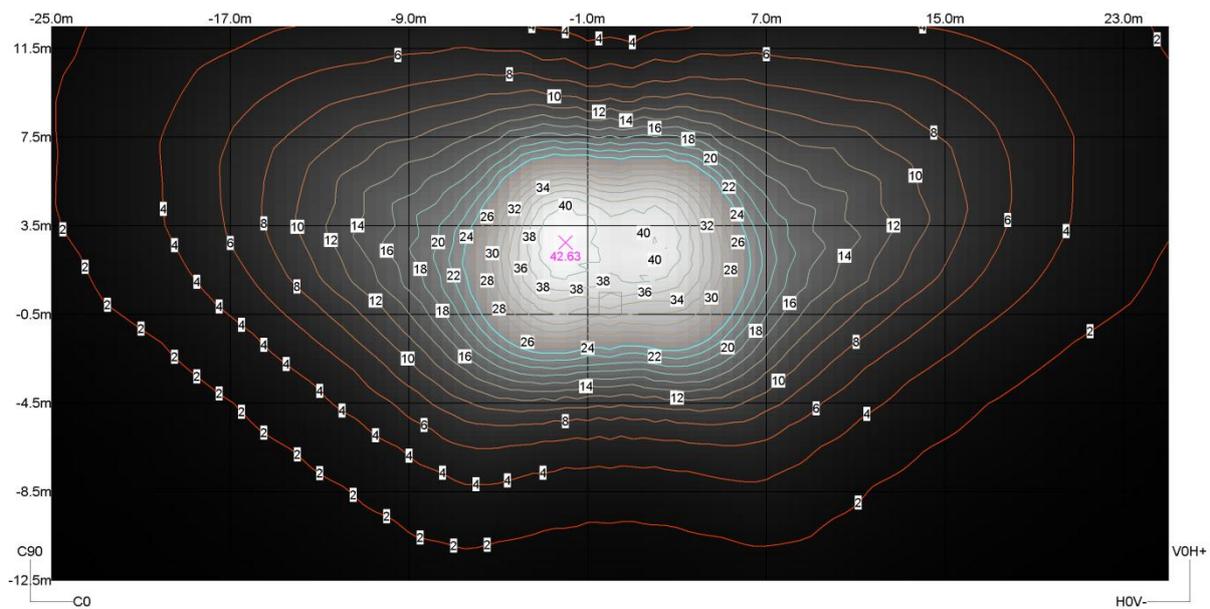


Figura 18 Curve Isolux per lente LEDIL C 12360 2x2 DWN

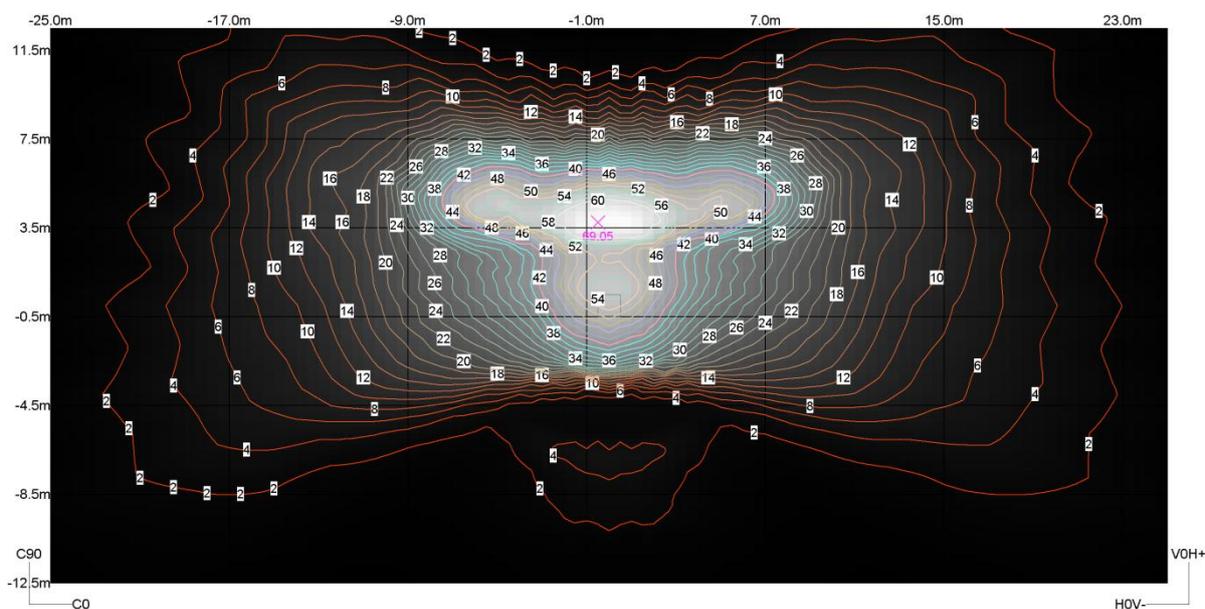


Figura 19 Curve isolux per lente LEDIL C 12419 2x2 A-T

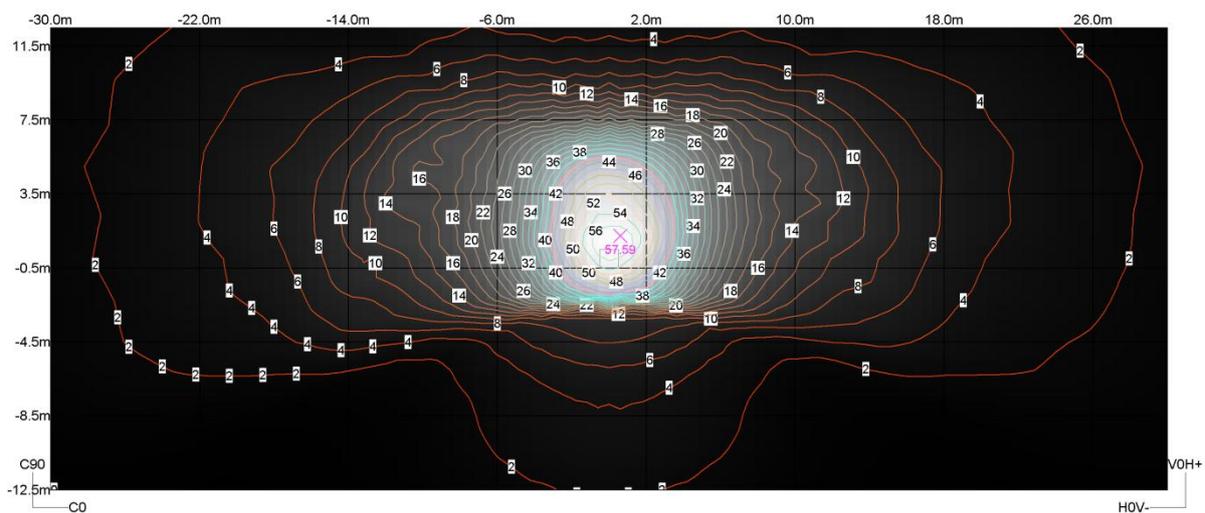
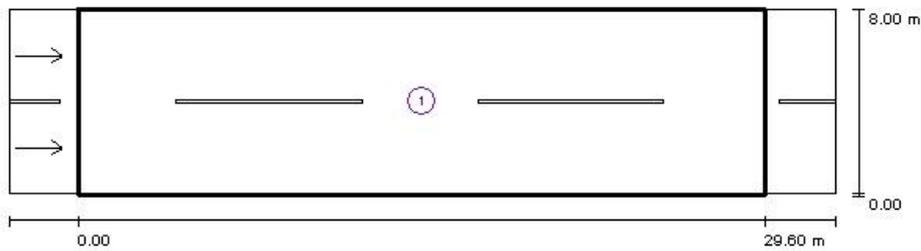


Figura 20 Curve isolux per lente LEDIL C 12362 2x2 DWC

Dall’esame delle curve isolux (Figura 18, Figura 19 e Figura 20) si deduce i 3 prodotti analizzati sono adatti a diverse configurazioni di impianto: il modello 2x2 DWC (C12362) risulta adatto per applicazioni in cui l’interdistanza è circa 6 volte l’altezza di montaggio, senza necessità di inclinare l’apparecchio (con larghezza di strada di poco inferiore all’altezza di montaggio), la lente C12419 2x2 A-T è adatta per impianti in cui l’altezza di montaggio è superiore alla larghezza della carreggiata, mentre le lenti C12360 2x2 DWN sono adatte a impianti in cui il rapporto tra altezza di installazione dei centri luminosi e larghezza della carreggiata sia prossimo all’unità.

Per il sistema ottico Khatod Nactus, stante la distribuzione fotometrica considerata, il flusso minimo che consente il raggiungimento dei requisiti della categoria ME3a, risulta pari a 10644 lm: in tale circostanza i risultati impiantistici sarebbero quelli riportati alla Figura 21.

Strada 1 / Risultati illuminotecnici



Fattore di manutenzione: 0.80

Scala 1:255

Lista campo di valutazione

- 1 Campo di valutazione Carreggiata 1
Lunghezza: 29.600 m, Larghezza: 8.000 m
Reticolo: 10 x 6 Punti
Elementi stradali corrispondenti: Carreggiata 1.
Manto stradale: C2, q0: 0.070
Classe di illuminazione selezionata: ME3a

(Tutti i requisiti fotometrici sono rispettati.)

| | L_m [cd/m ²] | U0 | UI | TI [%] | SR |
|------------------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Valori reali calcolati: | 1.00 | 0.50 | 0.70 | 11 | 0.65 |
| Valori nominali secondo la classe: | ≥ 1.00 | ≥ 0.40 | ≥ 0.70 | ≤ 15 | ≥ 0.50 |
| Rispettato/non rispettato: | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Figura 21 Risultati impiantistici sistema ottico Khatod Nactus

Alla Figura 22 è riportata l'indicatrice di emissione dell'apparecchio, dopo averne modificato il flusso per il raggiungimento dei requisiti prefissati, mentre alla Figura 23 è riportato il diagramma del fattore di utilizzazione (per L/H=1 vale circa 0.41 per il lato strada).

In questa configurazione il numero di LEDs appare fissato (pari a 48) e l'unico grado di libertà per il progettista è variare la corrente di pilotaggio (inizialmente conviene considerare dei valori standard, come 350 mA, 550 mA, 700 mA, in modo da disporre di un'ampia gamma di alimentatori tra cui scegliere).

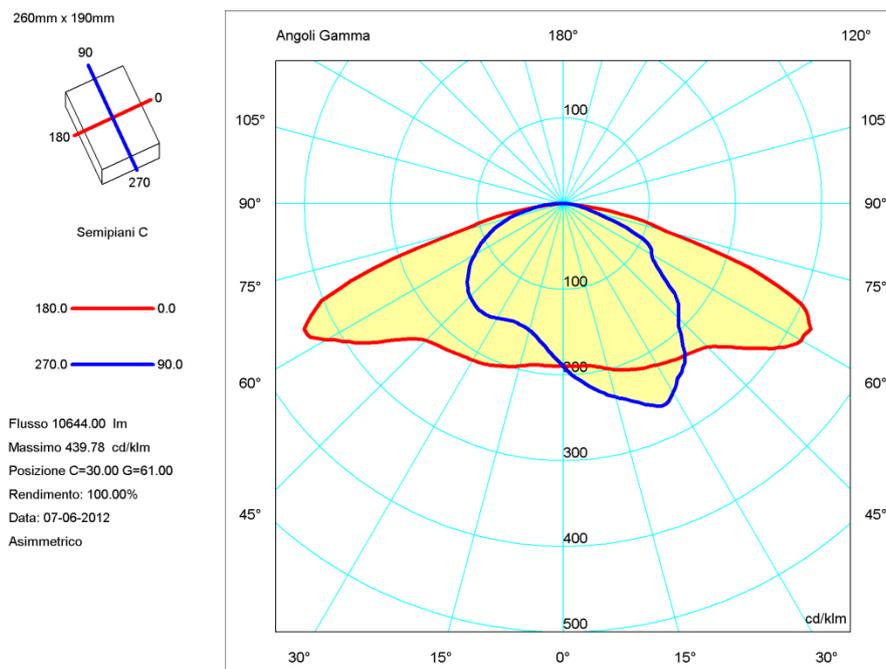


Figura 22 Indicatrici di emissione nei piani principali C0-180° e C90°-270 per il prototipo Khatod NACTUS

Considerando lo stesso LED utilizzato per il prototipo (Cool-White con temperatura correlata di colore compresa 5000 K e 6300 K con un valore tipico di 5650 K), la temperatura di giunzione deve essere fissata nell'intorno di 70°C affinché il flusso luminoso emesso si avvicini a quello richiesto (si ottengono 10417 lm @700mA Tj=70°C) La potenza assorbita dai LEDs raggiunge in questo caso 98 W circa di cui circa 85% si converte in calore che deve essere dissipato⁷.

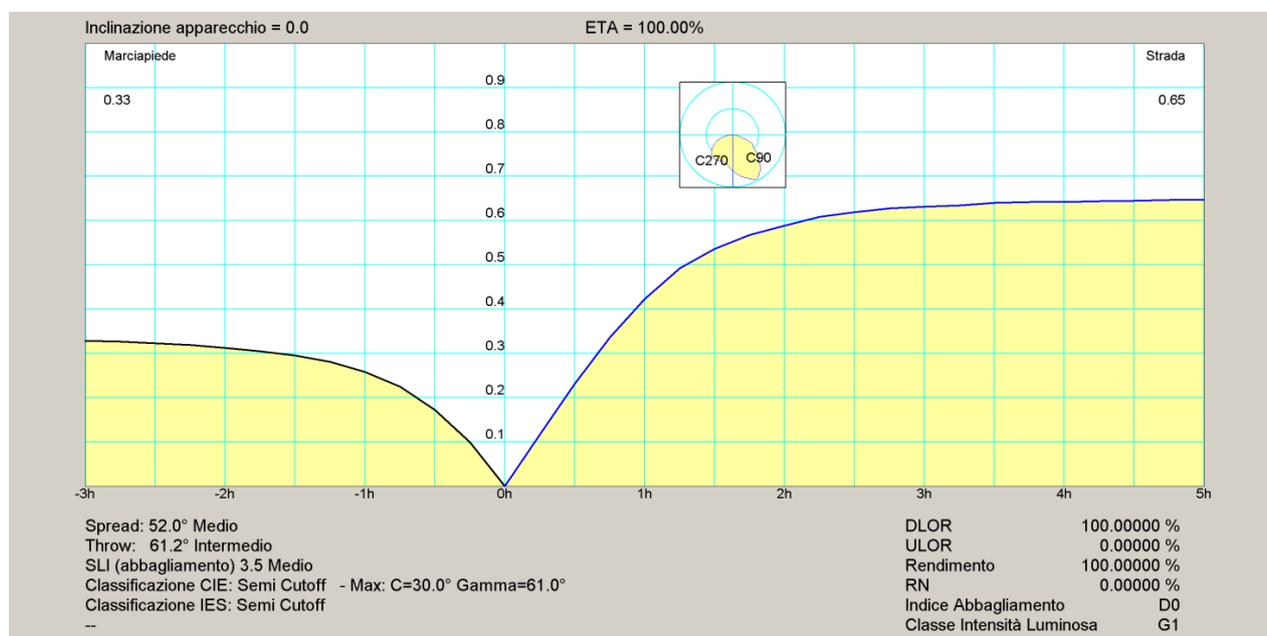


Figura 23 Fattore di utilizzazione per il prototipo Khatod NACTUS

Aumentando la temperatura di giunzione a Tj=75°C, il flusso si riduce a 10321 lm, mentre a 750 mA, per lo stesso valore di temperatura di giunzione, il flusso raggiunge i 10945 lm con una potenza assorbita dai led di circa 105 W.

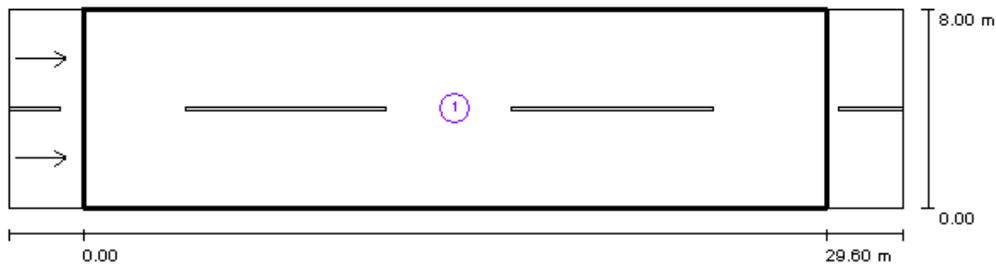
Per questo specifico componente potrebbe non essere necessario uno schermo di protezione, dal momento che la protezione contro l'ingresso di polveri e acqua è realizzato dall'accoppiamento tra supporto/dissipatore e lenti.

Dall'esame delle risultanze impiantistiche, si osserva che l'apparecchio raggiunge livelli elevati di uniformità generale e longitudinale, mentre per quanto concerne l'abbagliamento la schermatura meccanica dell'apparecchio (necessaria al soddisfacimento di alcune leggi regionali sull'inquinamento luminoso) dovrebbe aiutare a ridurre il valore, senza pregiudicare il rispetto degli altri limiti (uniformità longitudinale).

Per quanto riguarda il prototipo T-LED, il flusso minimo emesso necessario al raggiungimento dei requisiti della categoria illuminotecnica ME3a, risulta pari a 9095 lm (Figura 24): anche in questo caso, come nel precedente, la stima esatta del flusso necessario presuppone la conoscenza del rendimento del sistema ottico in esame.

⁷ Un calcolo maggiormente accurato dovrebbe tenere conto del rendimento del sistema ottico, che di norma risulta superiore al 90%

Strada 1 / Risultati illuminotecnici



Fattore di manutenzione: 0.80

Scala 1:255

Lista campo di valutazione

- 1 Campo di valutazione Carreggiata 1
Lunghezza: 29.600 m, Larghezza: 8.000 m
Reticolo: 10 x 6 Punti
Elementi stradali corrispondenti: Carreggiata 1.
Manto stradale: C2, q0: 0.070
Classe di illuminazione selezionata: ME3a

(Tutti i requisiti fotometrici sono rispettati.)

| | L_m [cd/m ²] | U0 | UI | TI [%] | SR |
|------------------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Valori reali calcolati: | 1.00 | 0.55 | 0.83 | 13 | 0.58 |
| Valori nominali secondo la classe: | ≥ 1.00 | ≥ 0.40 | ≥ 0.70 | ≤ 15 | ≥ 0.50 |
| Rispettato/non rispettato: | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Figura 24 Risultati impiantistici sistema ottico T-LED SLST01

Alla Figura 25 è riportata l'indicatrice di emissione dell'apparecchio, dopo averne modificato il flusso per il raggiungimento dei requisiti prefissati, mentre alla Figura 26 è riportato il diagramma del fattore di utilizzazione (per L/H=1 vale circa 0.45 per il lato strada).

Supponendo di voler realizzare un sistema che raggiunga le prestazioni impiantistiche della categoria illuminotecnica ME3a, supponendo di utilizzare un LED CREE XT_E, Outdoor (CCT compresa tra 4000 K e 6200K), scegliendo una selezione di flusso R5 (139 lm per T_j=85°C @350 mA), si stima che occorrono circa 36 LED (organizzati in 9 moduli da 4 LEDs ciascuno) alimentati alla corrente di 700 mA per il raggiungimento dell'obiettivo (il sistema di dissipazione dovrebbe garantire che la temperatura di giunzione sia attorno a 70°C).

In questo caso il flusso emesso sarebbe pari a 256 lm*36 LEDs=9212 lm, con una potenza assorbita pari a 2.157W*36=77.65 W.⁸

⁸ In questo caso la realizzazione del desiderato grado di protezione IP potrebbe richiedere l'utilizzo di uno schermo di chiusura aggiuntivo (con conseguente penalizzazione delle prestazioni fotometriche).

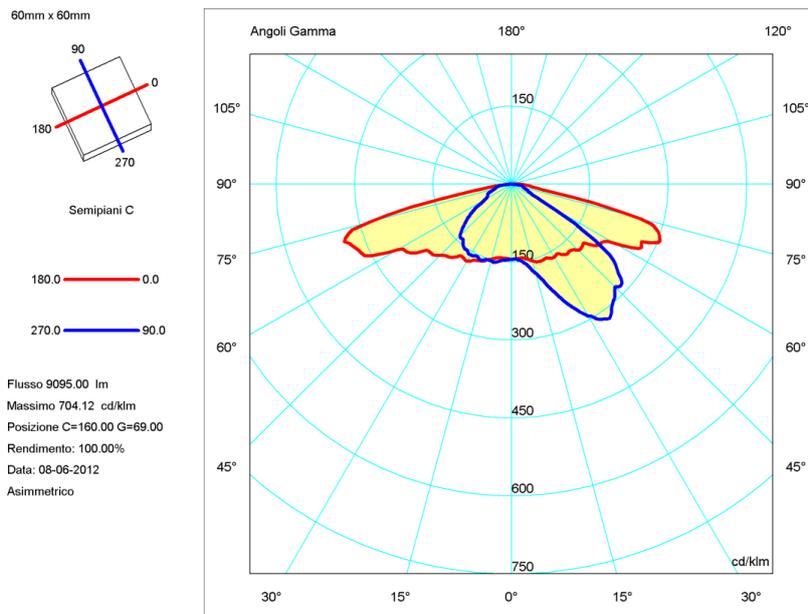


Figura 25 Indicatrici di emissione nei piani C0-180° e C90-270° per il sistema ottico TLED SLST01

Dall’esame delle risultanze impiantistiche, si osserva che l’apparecchio raggiunge livelli elevati di uniformità generale e longitudinale, anche migliori rispetto al caso precedente. Per quanto concerne l’abbagliamento, la schermatura meccanica dell’apparecchio (necessaria al soddisfacimento di alcune leggi regionali sull’inquinamento luminoso) dovrebbe aiutare a ridurre il valore, lasciando al progettista più ampi margini di libertà formale nel design del prodotto rispetto al caso precedente (i valori di U_o e U_l sono molto elevati).

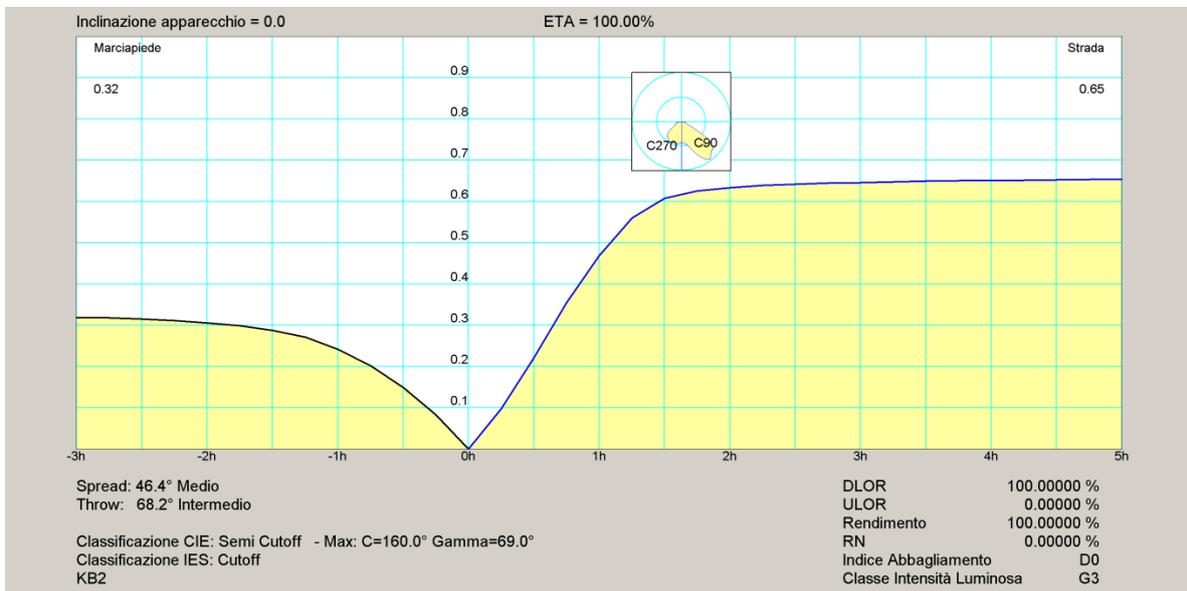


Figura 26 Fattore di utilizzazione per il prototipo T-LED SLST01

Per quanto riguarda la caratterizzazione colorimetrica dei dispositivi esaminati, le misure sono state condotte dopo il raggiungimento delle condizioni di equilibrio termico e a partire dalle distribuzioni del flusso radiante spettrale, sono stati quindi determinati i valori di CCT e di CRI a partire dai dati spettrali misurati; il calcolo della CRI è stato effettuato utilizzando il programma di calcolo CIE della pubblicazione 13.2.

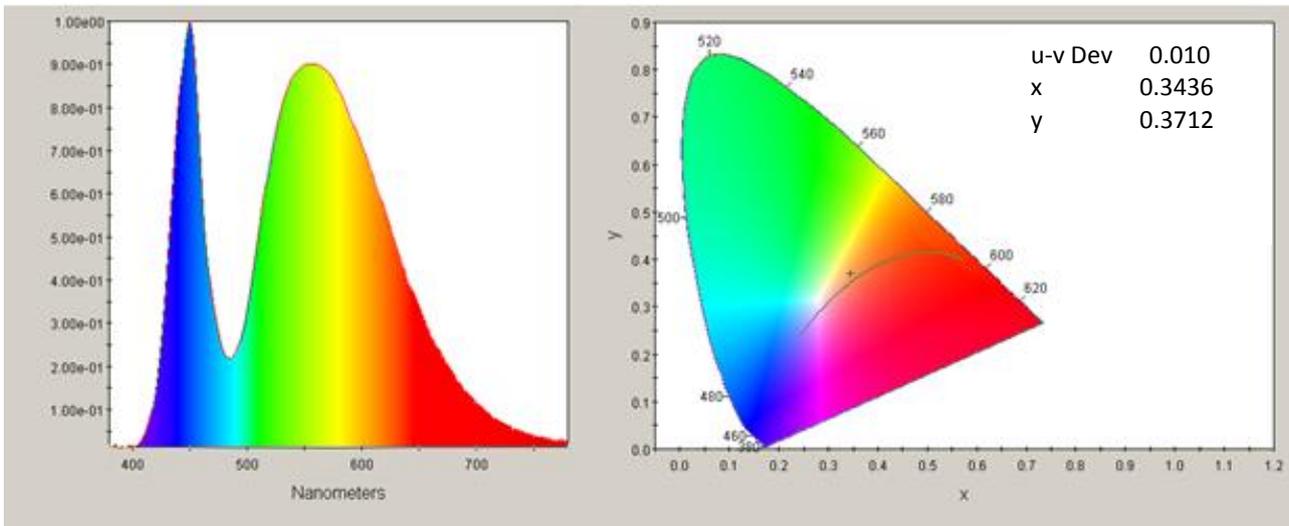


Figura 27 Irradianza spettrale normalizzata e coordinate cromatiche dei LED LUMILEDS REBEL ES ANSI LXML-PWC1-0100 V0 C, utilizzati in accoppiamento con l'ottica Khatod Nactus

La Figura 27 mostra lo spettro normalizzato e le coordinate cromatiche nello spazio colore CIE 1931. La temperatura di colore risulta pari a 5111 K, mentre l'indice di resa cromatica CRI risulta pari a 71.

Il valore dell'indice CQS (Color Quality Scale) risulta invece pari a 73, mentre il del LER risulta pari a 334 lm/W alla corrente di 550 mA.

La Figura 28 mostra la sovrapposizione tra la gamut area dell'illuminante di riferimento e quella sorgente di test che risulta sufficientemente buona ad eccezione della zona del rosso, dove si registrano i maggiori scostamenti tra le due curve.

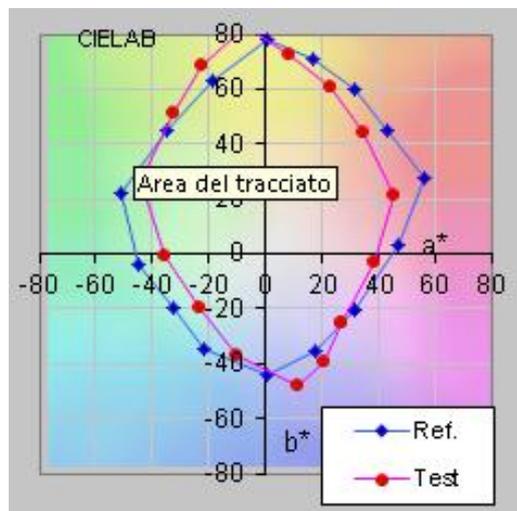


Figura 28 Confronto tra la Gamut area dell'illuminante di riferimento con quello di test, per il sistema formato dai LED LUMILEDS REBEL ES ANSI LXML-PWC1-0100 V0 C, utilizzati in accoppiamento con l'ottica Khatod Nactus

Per quanto riguarda le lenti LEDIL Strada, le caratteristiche colorimetriche e di resa cromatica dei LEDs impiegati nel rilievo, risultano le seguenti: temperatura correlata di colore pari a 5523 K, indice di resa cromatica CRI pari a 65 (per il dettaglio degli indici parziali, si veda la Figura 30)

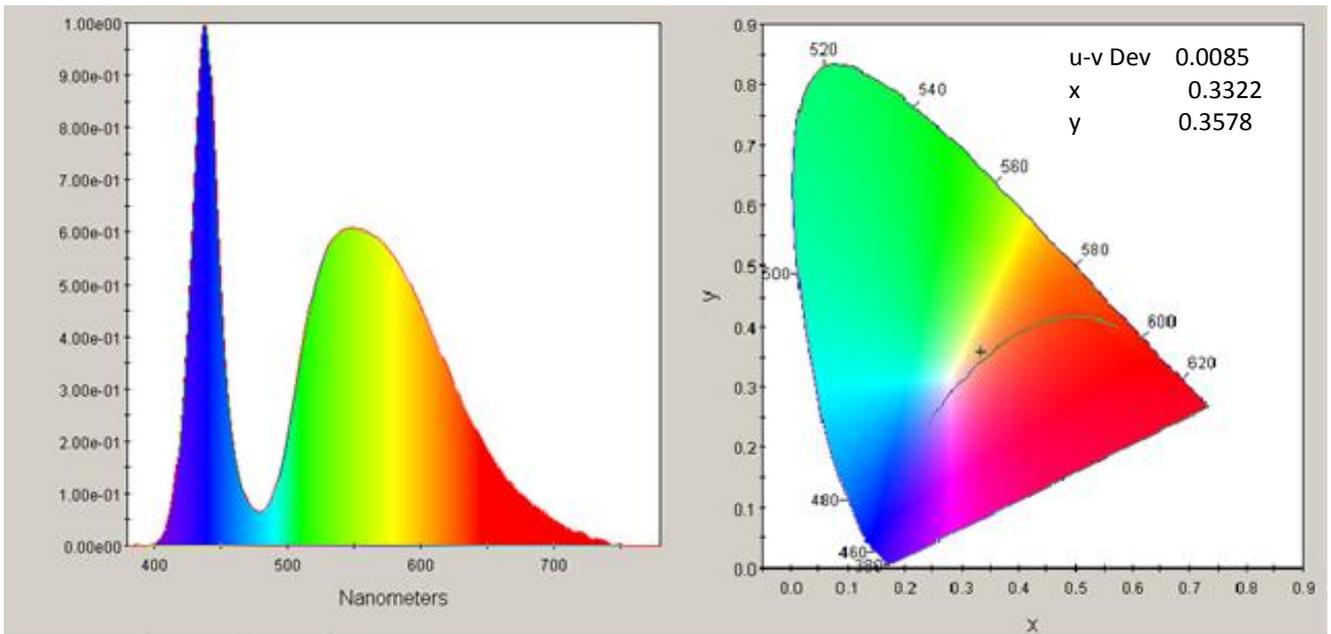


Figura 29 Irradianza spettrale normalizzata e coordinate cromatiche dei LED CREE XM-L, utilizzati in accoppiamento alle ottiche LEDIL

Il valore dell'indice di resa cromatica, sebbene inferiore a quello misurato per il sistema ottico Khatod Nactus, appare comunque adeguato per una applicazione di illuminazione stradale a traffico motorizzato.

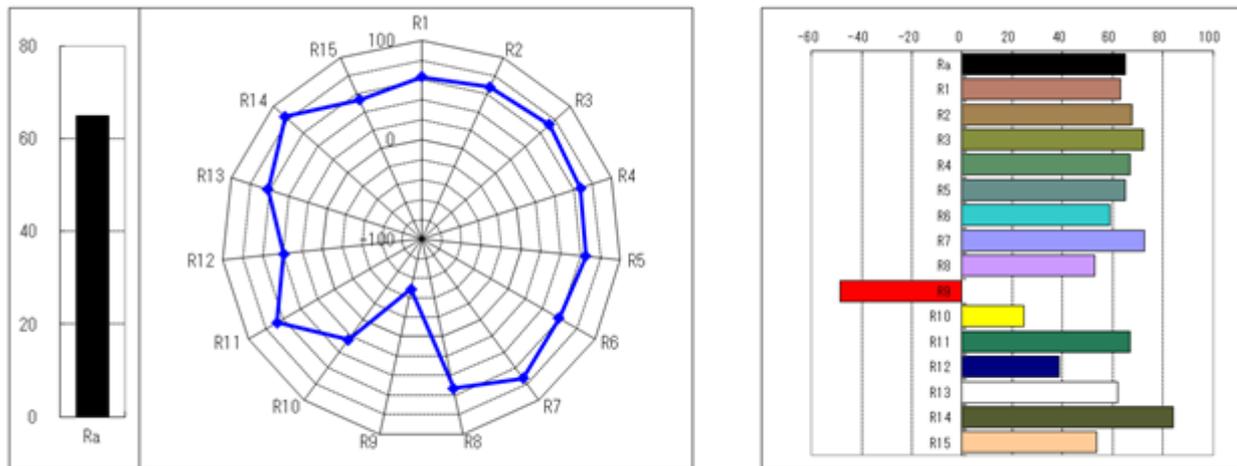


Figura 30 Valori indice CRI per i LEDs CREE XM-L utilizzati per il rilievo delle lenti LEDIL Strada.

Il valore dell'indice CQS (Color Quality Scale), relativamente al modulo esaminato, risulta invece pari a 69. La Figura 31 mostra la sovrapposizione tra la gamut area dell'illuminante di riferimento e quella sorgente di test (CREE XM-L) che risulta discreto ad eccezione della zona del rosso, dove si registrano i maggiori scostamenti tra le due curve.

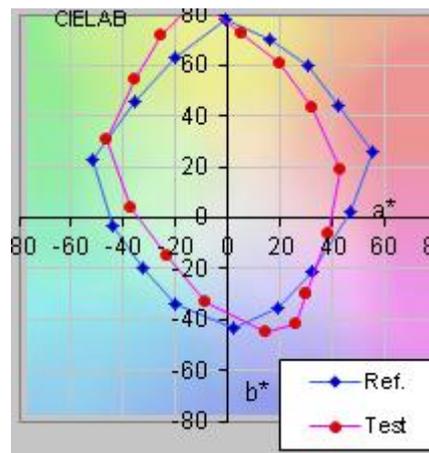


Figura 31 Confronto tra la Gamut area dell'illuminante di riferimento con quello di test, rappresentato dai LED CREE XM-L

Dall'esame dei risultati, possiamo concludere che il LED esaminato risulta molto efficiente (118 lm/W @1200 mA), con valore del LER pari a 337 lm/W.

Per quanto riguarda il sistema ottico T-LED SL ST 01⁹, la valutazione delle caratteristiche colorimetriche e di resa cromatica hanno riguardato il dispositivo completo di lenti, dal momento che non è stato possibile separarle dal MCPCB senza correre il rischio di danneggiarle.

La misura è stata condotta alla corrente di alimentazione di 550 mA, dando luogo allo spettro rappresentato alla Figura 32.

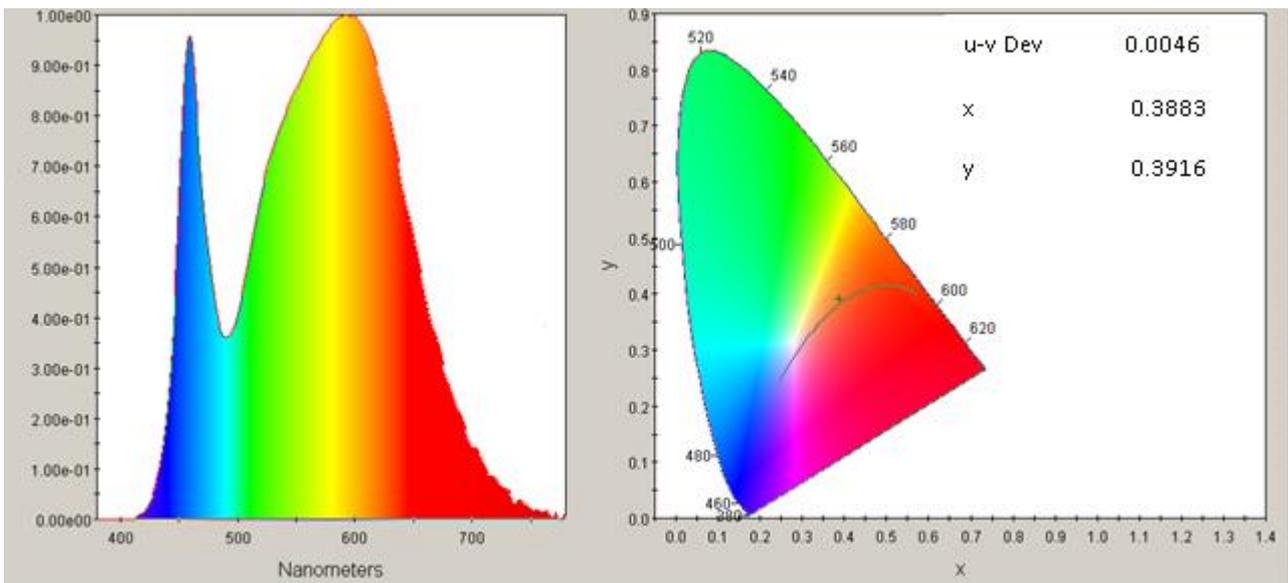


Figura 32 Irradianza spettrale normalizzata e coordinate cromatiche dei LED CREE XT, utilizzati in accoppiamento alle ottiche T-LED SL ST 01

La temperatura correlata di colore è risultata pari a 3904 K, mentre l'indice di resa cromatica (CRI) raggiunge un valore 82, discretamente elevato per una applicazione di illuminazione urbana. Il dettaglio degli indici di resa cromatica parziale per ciascun colore sono riportati alla Figura 34.

L'indice CQS in questo caso coincide perfettamente con il CRI e la sovrapposizione tra la gamut area dell'illuminante di riferimento e quella sorgente di test risulta sufficientemente buona per tutti i campioni cromatici esaminati dall'indice (Figura 33).

⁹ Le lenti esaminate funzionavano in accoppiamento con il LED CREE XT

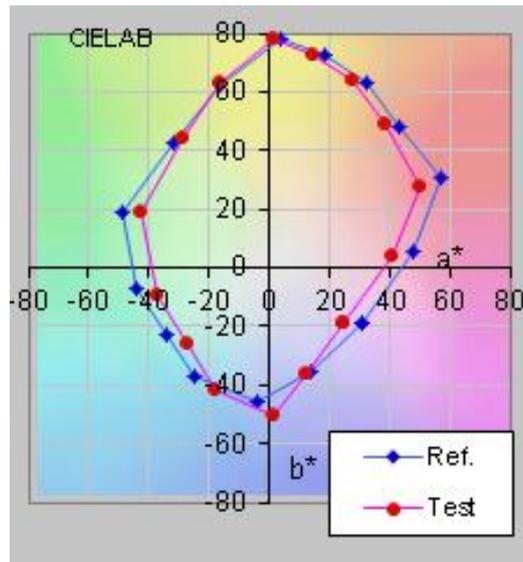


Figura 33 Confronto tra la Gamut area dell'illuminante di riferimento con quello di test, per il sistema formato da i LED CREE XT e dal sistema ottico T-LED SL ST 01

Il valore del LER risulta pari a 333 lm/W alla corrente di 550 mA, in linea con i valori riscontrati negli altri dispositivi esaminati.

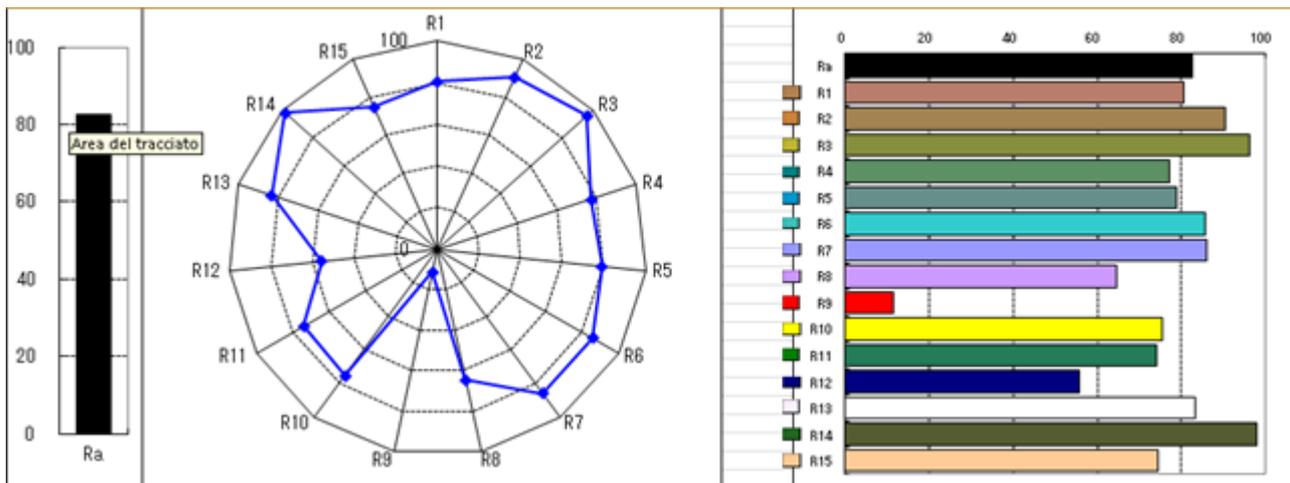


Figura 34 Valori indice CRI del sistema formato da i LED CREE XT e dal sistema ottico T-LED SL ST 01

Comparazione di solidi fotometrici

Il metodo di confronto implementato fa riferimento all'articolo di ASJ Bergen, "A practical method of comparing luminous intensity distributions", Lighting Reserch and Technology 2012 44:27-36.

L'algoritmo proposto è stato sviluppato dall'autore come procedura di confronto tra le fotometrie ottenute da misura di campo lontano e di campo vicino, all'interno dei lavori della CIE Division 2 Technical Committees.

Ci possono essere diverse occasioni in cui si desidera comparare due distribuzioni fotometriche:

- Supponiamo ad esempio che uno stesso apparecchio sia stato misurato da due differenti laboratori e che si desideri comparare i punti di misura corrispondenti tra i due rilievi in termini di intensità luminose

- Supponiamo di voler comparare i dati forniti da un costruttore di dispositivi ottici (simulati o misurati) con quelli ottenuti da un laboratorio di misura indipendente impegnato nello sviluppo di un nuovo prodotto di illuminazione.

Ci sono una serie di fattori che influiscono sull'intera distribuzione che rendono difficile un confronto basato sulla valutazione delle differenze tra due tabelle di valori.

Alcuni di questi fattori sono:

- Piccole variazioni nell'allineamento reciproco tra le due rilievi, determinano significative variazioni nelle distribuzioni luminose misurate, con particolare riferimento alle zone dove la distribuzione varia con un gradiente molto elevato (es. nelle zone di cut-off dove la distribuzione fotometrica varia bruscamente per soddisfare i requisiti di abbagliamento)
Le piccole differenze di orientamento tra due rilievi o tra rilievo e la misura sono molto frequenti quando si è chiamati a misurare sistemi costituiti da LED e lenti (di piccole dimensioni e quindi difficilmente manipolabili) in prototipi realizzati manualmente dove gli allineamenti e le tolleranze di montaggio sono più elevati
- L'apparecchio mostra una dipendenza elevata dell'emissione luminosa dalla temperatura o dalle variazioni dei parametri di alimentazione : in questo caso le distribuzioni fotometriche sono simili, ma presentano un differente fattore di scala.

Il metodo più spesso adottato per il confronto consiste nell'esaminare i risultati impiantistici prodotti dai rilievi fotometrici da comparare inseriti in una configurazione di impianto ritenuta significativa: questo rappresenta certamente un metodo molto efficace quando si voglia esaminare il problema guardandolo dal lato dell'applicazione.

L'indice che misura la bontà del "fitting" tra due distribuzioni fotometriche, si basa sulla comparazione delle misure delle intensità luminose corrispondenti fissata una coppia di angoli (C,γ) estratte dalla tabella delle intensità di due rilievi fotometrici.

$$f_{\text{luminaire,fit}} = 100 * \left(1 - \frac{\sum_{C=0}^{360} \sum_{\gamma=0}^{180} (I_1(C, \gamma) - I_2(C, \gamma))^2}{\sum_{C=0}^{360} \sum_{\gamma=0}^{180} (I_1(C, \gamma) + I_2(C, \gamma))^2} \right)$$

Dove $I_1(C, \gamma)$ e $I_2(C, \gamma)$ sono le intensità luminose della distribuzione della prima e della seconda distribuzione rispettivamente, valutate nella direzione individuata dalla coppia (C,γ).

Se le due distribuzioni sono identiche, la metrica fornisce 100, se sono completamente diverse (es. confronto una distribuzione con emissione solo nell'emisfero inferiore e una solo in quello superiore), si avrà come risultato 0.

Un valore di 98 è un buon risultato e un valore di 99 rappresenta un ottimo risultato¹⁰.

Il rapporto tra il flusso luminoso ottenuto dalla distribuzione di intensità 1 e quello ottenuto dalla distribuzione di intensità 2, è utilizzato come fattore di correzione per la determinazione dell'indice

$f_{\text{luminaire,max}}$

$$f_{\text{luminaire,flux}} = \frac{F_1}{F_2}$$

Il valore $f_{\text{luminaire,max}}$ è la versione ottimizzata dell'indice $f_{\text{luminaire,fit}}$, che si ottiene dopo aver applicato le rotazioni della fotometria 2 rispetto ai 3 assi fotometrici che massimizzano il valore di $f_{\text{luminaire,fit}}$ e dopo averne normalizzato il flusso al valore della fotometria 1. Le tre rotazioni potrebbero essere dovute a un imperfetto allineamento dell'apparecchio sul goniometro durante la misura 2 rispetto alla condizione di allineamento, assunta come corretta, del rilievo 1.

Per maggiori dettagli sull'implementazione degli indici si rimanda all'articolo citato.

¹⁰ Secondo le indicazioni dell'autore dell'articolo, tenuto conto che si riferiscono alla comparazione di due misure ottenute con differente strumentazione, ma riferite al **medesimo** dispositivo.

Nel nostro caso, il valore dell'indice $f_{\text{luminare,max}}$ si ottiene solo applicando la correzione del solo flusso¹¹ dal momento che vengono confrontate le tabelle delle intensità di due dispositivi simili ma non identici, come verrà meglio illustrato nel seguito.

Apparecchio ENEA PLUS SENSE

L'apparecchio ENEA PLUS SENSE, in fase di prototipazione, sfrutta gli stessi moduli luminosi dell'apparecchio ENEA PLUS, sviluppati nel corso del precedente progetto.

Si è resa tuttavia necessaria una nuova misurazione fotometrica dei due campioni realizzati a causa della sostituzione del blocco lenti che erano state originariamente montate nella fase di prototipazione (le vecchie e le nuove lenti dovrebbero differire solo per il sistema di fissaggio meccanico del componente al MCPCB, e non per la distribuzione fotometrica che invece dovrebbe essere rimasta invariata).

La geometria delle nuove lenti (denominate SQUARE) dovrebbe garantire il desiderato grado di protezione contro i liquidi e le polveri all'interno del vano ottico, senza l'ausilio di uno schermo aggiuntivo di protezione, secondo quanto inizialmente previsto dal progetto.

Risulta quindi chiaro che non avrebbe senso applicare il confronto di fotometrie, andando a ricercare la tripletta di angoli di rotazione dell'apparecchio secondo i suoi assi, che massimizzano $f_{\text{luminare,fit}}$ mentre ha significato applicare il fattore di correzione del flusso luminoso¹².

¹¹ Sebbene la nostra implementazione abbia un meccanismo piuttosto sofisticato per la determinazione del migliore allineamento tra i due rilievi

¹² Il confronto tra le fotometrie non avviene infatti a parità di dispositivo misurato, a causa della sostituzione del blocco lenti e delle inevitabili differenze nell'assemblaggio e posizionamento delle lenti.

Misura apparecchio ENEA PLUS-ENEA PLUS SENSE

Produttore Apparecchio:

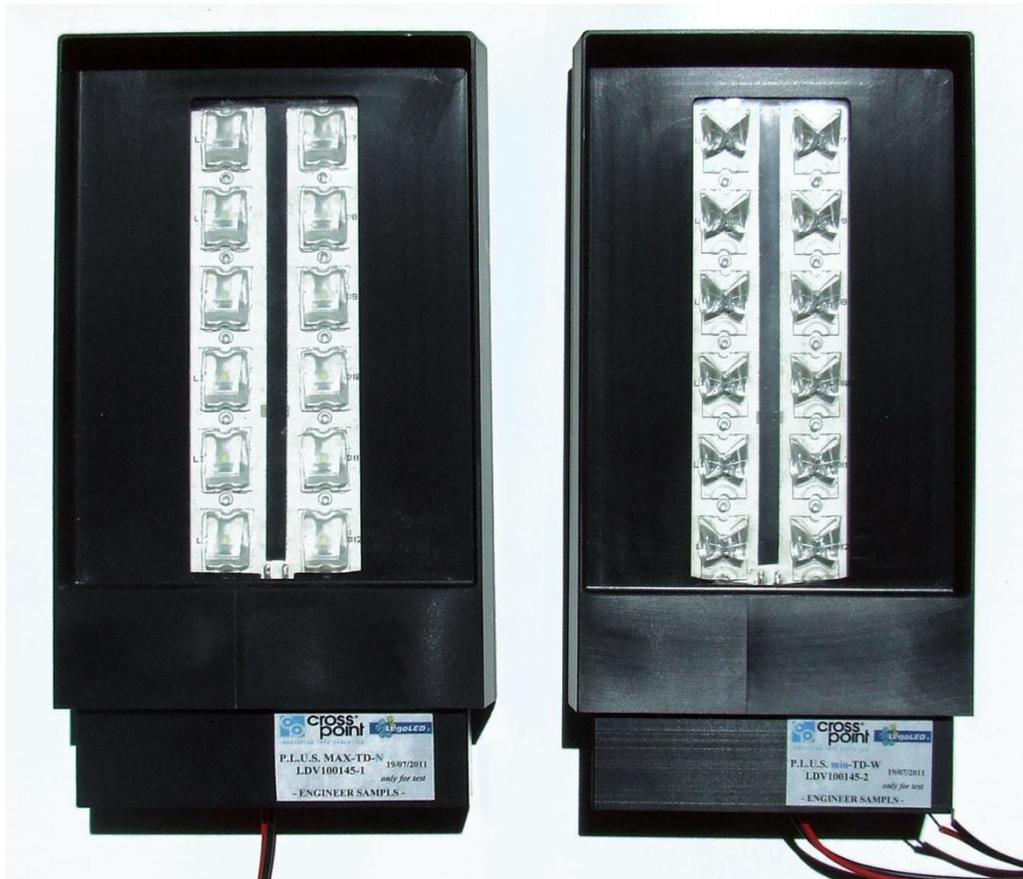
ENEA-CROSSPOINT-POLITECNICO DI MILANO

Apparecchio di illuminazione:

apparecchio modulare per illuminazione urbana con sorgenti LED

Codice Rilievo :

//



Data rapporto : 7-8 Maggio 2012

| | | |
|-----------------|--|-------------------------------------|
| Allegati | Rapporto di rilievo | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Matrice delle intensità | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Diagramma polare e file in formato standard (Eulumdat,IESNA) | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | | |

Rapporto di Rilievo apparecchio ENEA PLUS

| Dati Produttore | |
|---|--|
| Produttore | ENEA-CROSSPOINT-POLITECNICO DI MILANO |
| Codifica Politecnico | // |
| Indirizzo | Via Enrico Fermi 21020 Ispra (Varese) |
| Persona di riferimento | Dr.ssa Simonetta Fumagalli |
| Dati Apparecchio | |
| Tipologia: | Apparecchio stradale a LED |
| Modello : | PLUS (Cree XP-G+ lenti DW)-PLUS (Cree XP-G + lenti DN) |
| Descrizione | Apparecchio stradale 12 led con ottica integrata. Le prove sono state condotte su due differenti modelli, il primo equipaggiato con lenti LEDIL Strada DN SQAURE e il secondo con lenti LEDIL Strada DW SQUARE. |
| Dimensioni [mm] | 235x120x35 |
| Dimensioni area luminosa [mm] | 115X165 |
| Tipo e potenza lampada [W] | 12 LED – 12 W nominali (12.49 W). Tutti i led sono collegati in serie. |
| Riferimenti Lampade/Alimentatori di Laboratorio | L'apparecchio risulta sprovvisto di alimentatore e LED driver. Per le prove si è impiegato l'alimentatore corrente costante del laboratorio. |
| Dati Rilievo | |
| Data Rilievo | 7-8 Maggio 2012 |
| Tipo Rilievo | C- γ a passi costanti $\Delta C=5^\circ$ $\Delta \gamma=1.0^\circ$ (rilievo continuo) |
| Norma di Riferimento | UNI EN 13032, UNI 11356 |
| Tempo di stabilizzazione lampada | tempo di riscaldamento 45 minuti ¹³ |
| Numero di campioni testati | uno per ciascun modello |
| Dati Strumentazione Utilizzata | |
| Goniofotometro | A specchio secondo EN 13032 e Raccomandazione CIE 121 - Modello T4 Oxytech – Distanza rilievo 9.580 m |
| Stabilizzatore di Tensione | Elettrotest model TPS/M 6000 |
| Multimetro | Yokogawa modello WT230 |
| Luxmetro | Czibula & Grundmann |

¹³ Prima di essere sottoposti a misurazione i prodotti devono aver raggiunto l'equilibrio termico; il prodotto è considerato stabile quando ogni 3 letture fotometriche e della potenza elettrica, eseguite in 30 min a distanza di 15 min, non si verificano variazioni maggiori dell'1%.

Alimentatore in CC

ISOTECH

- Tensione di uscita 0-40 V CC (risoluzione 10 mV)
- Corrente di uscita 0~5 A (risoluzione in 2 mA)
- Regolazione tensione carico ≤ 10 mV
- Regolazione corrente carico ≤ 5 mA
- Regolazione tensione linea $\leq 0.05\%$
- Regolazione corrente linea $\leq 0.05\%$
- Tensione ondulazione ≤ 20 mV rms
- Corrente ondulazione ≤ 10 mA rms

Parametri Elettrici di Rilievo

Le prove sono state condotte a corrente costante, di intensità 350 mA (come previsto dalle specifiche di progetto)

Condizioni Ambientali

| | |
|---------------------------------|----------------|
| Temperatura di Laboratorio [°C] | 25°C \pm 1°C |
| Umidità Relativa | 50% |
| Movimento Aria | < 0.2 m/s |

Note Rilievo

- I dati del presente rapporto sono corrispondenti con quelli rilevati nelle modalità più sopra citate
- Il presente rapporto riguarda solo il campione sottoposto a prova
- L'estensione del presente rapporto ad altri esemplari esce dai limiti del rapporto stesso.
- I valore della potenza elettrica indicato nel file *.ldt e *.ies non tiene conto del rendimento del sistema di alimentazione e si riferisce alla sola potenza dissipata sui 12 led che equipaggiano ciascun apparecchio.
- I dati per $\gamma=90^\circ$ non sono stati depurati del contributo dovuto all'inquinamento del laboratorio¹⁴, dal momento che non è stata effettuata la valutazione della rispondenza alle leggi sull'inquinamento luminoso.
- La prova è stata ripetuta a seguito della sostituzione delle lenti su entrambi i prototipi

Elaborazioni ENEA PLUS

Utilizzando le fotometrie relative ai due prototipi misurati, per comodità di elaborazione impiantistica, sono state composte 3 differenti fotometrie, che rappresentano alcune delle combinazioni di moduli previste in fase di progetto¹⁵.

Le configurazioni esaminate sono le seguenti:

- 2 DW+2 DN

¹⁴ L'inquinamento a cui si fa riferimento riguarda la luce parassita dovuta prevalentemente al riflesso del supporto di fissaggio dell'apparecchio al goniometro.

¹⁵ Cfr con quanto previsto nella relazione di progetto per l'apparecchio ENEA PLUS

- 4 DW
- DW+DN

La corrispondenza tra le combinazioni dei moduli e il contesto applicativo è illustrato alla Figura 35.

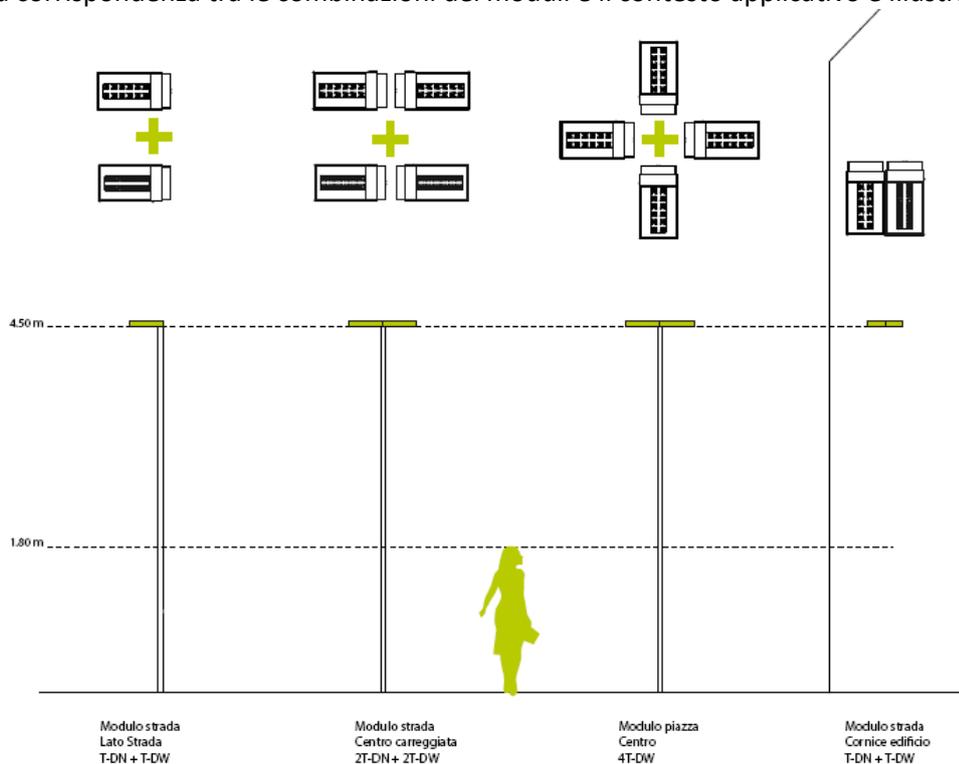


Figura 35 La tavola mostra la corrispondenza tra la combinazione delle fotometrie dei due moduli e l’applicazione impiantistica in un contesto d’uso.

Le indicatori di emissione nei due semipiani principali C0-180 e C90-270 ottenute dalla composizione delle fotometrie DW+DN, sono riportate alla Figura 36: il flusso luminoso complessivamente emesso risulta pari a 2120 lm, corrispondente a una potenza di 24.79 W (escludendo il sistema di alimentazione) con una efficienza di 85.5 lm/W.

Si osserva che quest’ultimo dato potrebbe essere suscettibile di miglioramento semplicemente considerando le nuove selezioni disponibili per la stessa tipologia di LED (R5 con una temperatura di colore pari a 5300 K) con un aumento del flusso luminoso del 7% a parità di potenza elettrica impiegata¹⁶.

¹⁶ Il modulo attuale è composto da 12 LED CREE XP-G selezione R4 con un flusso di 130 lumen ($T_j=25^\circ\text{C}$) a 350 mA per ciascun LED e una temperatura di colore compresa tra 4000 e 5300 K. (codice di ordine XPG WHT-01-0000-00GC2).

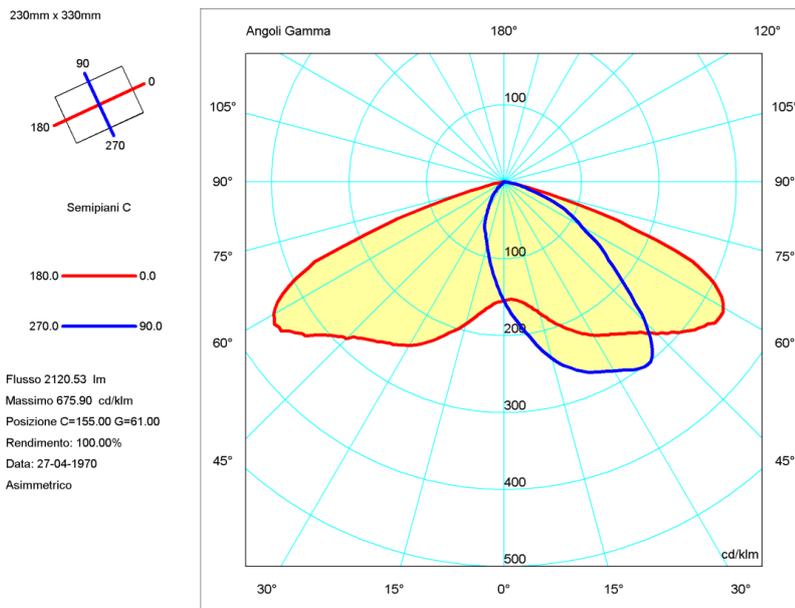


Figura 36 Indicatrici di emissioni sui piani C0-180 e C90-270 per il sistema composto da un modulo DW e da uno DN

L'apparecchio distribuisce il 21% del flusso emesso verso il marciapiede e il 78% circa verso la strada: per un rapporto larghezza su altezza di installazione pari a 1 ($L/H=1$), il fattore di utilizzazione vale circa 0.44 (Figura 37).

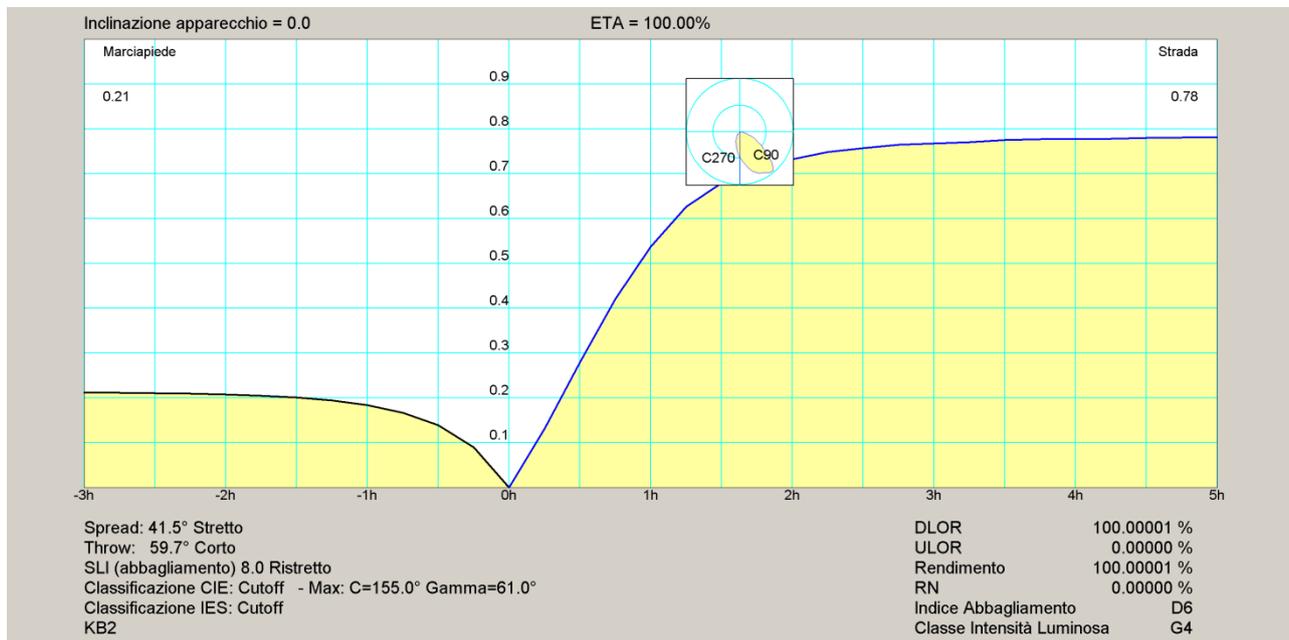


Figura 37 Fattore di utilizzazione per l'apparecchio composto da una coppia di moduli (DW + DN)

Le indicatrici di emissione nei due piani principali ottenute componendo 4 fotometrie DW, in modo tale che ciascuna che differisca dalla precedente per una rotazione in senso orario di 90° intorno alla direzione $Y=0^\circ$, sono riportate alla Figura 38: il flusso luminoso complessivamente emesso risulta pari a 4056 lm, corrispondente a una potenza di 49.2 W (escludendo il sistema di alimentazione) con una efficienza di 82.4 lm/W.

Anche in questo caso vale la notazione precedente, sulla disponibilità di nuove selezioni.

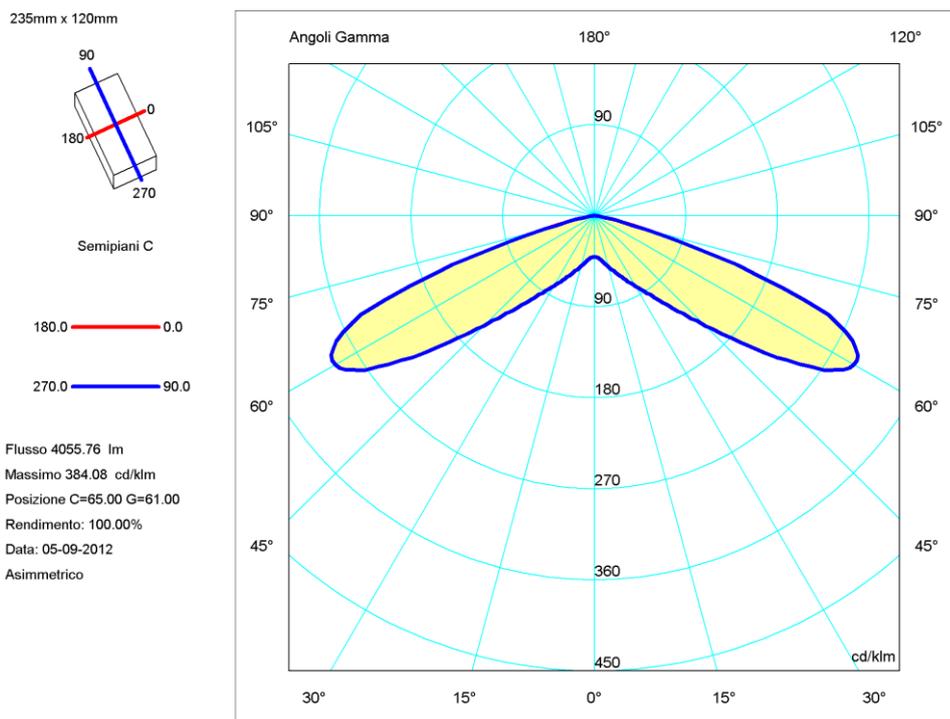


Figura 38 Indicatrici di emissioni sui piani C0-180 e C90-270 per il sistema composto da 4 moduli DW

Le curve isolux dell'apparecchio (posto ad un'altezza di installazione di 4.50 m), sono riportate alla Figura 39: questa distribuzione fotometrica, in cui l'apparecchio è posto nell'origine del sistema di riferimento risulta adatta per l'illuminazione di parchi e giardini.

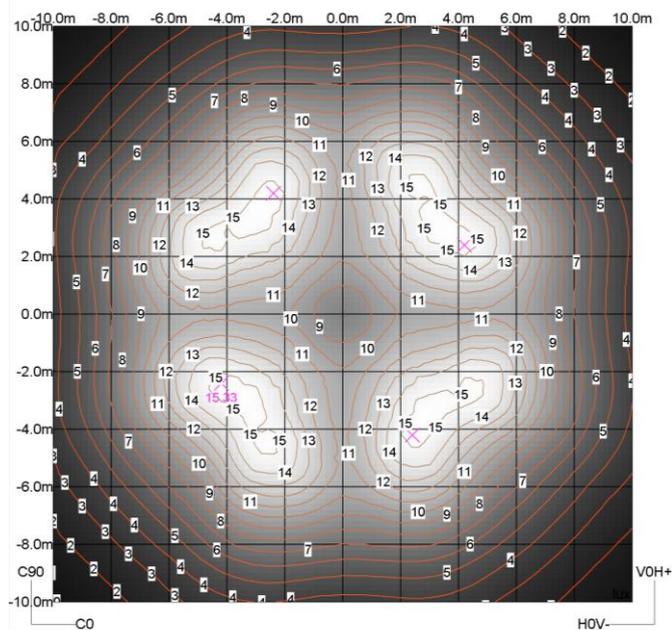


Figura 39 Curve isolux ottenute ponendo l'apparecchio a 4.5 m di altezza (apparecchio si trova nell'origine del sistema di riferimento)

La comparazione dei solidi fotometrici prima e dopo la sostituzione delle lenti è stata condotta applicando gli indici $f_{luminaire,fit}$ e $f_{luminaire,max}$ secondo le modalità illustrate nel precedente paragrafo, alla fotometria composta da un modulo DN e da uno del tipo DW, ottenendo i risultati riassunti nella Tabella 4.

Tabella 4 Confronto tra le distribuzioni fotometriche dei moduli ENEA PLUS prima e dopo la sostituzione delle lenti

| Photom 01 ¹⁷ | Photom 02 | f_luminaire_fit | f_luminaire_flux | f_luminaire_fit_max | Flusso Photom_01 | Flusso Photom_02 |
|---------------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|---------------------|------------------|------------------|
| ENEA PLUS DW+DN (OLD).LDT | ENEA PLUS DN+DW (SQUARE).LDT | 93.48 | 1.09 | 94.17 | 2334.97 | 2150.12 |

Il matching tra le due fotometrie (nella configurazione DW+DN), dopo la normalizzazione del flusso emesso, risulta sufficientemente buono pari al 94 %.

Il fattore di normalizzazione del flusso raggiunge il 9%: la maggior differenza riguarda il modulo con le lenti DW, dove il flusso luminoso passa da 1115 lm a 1013 lm.

Il flusso luminoso relativo al modulo equipaggiato con lenti DN¹⁸, rimane pressoché simile e passa da 1180 lm a 1106 lm dopo la sostituzione delle lenti.

Conclusioni

Sulla base dei dati di misura ottenuti in questa attività, è stato possibile definire lo stato dell'arte sulle prestazioni dei principali sistemi ottici presenti sul mercato e ottenere in maniera affidabile e nel formato desiderato, le informazioni necessarie allo sviluppo del modulo PLUS ME, adatto a soddisfare i requisiti illuminotecnici delle strade a traffico veicolare (MExx).

Tale indagine dovrà essere aggiornata con le novità che compariranno sul mercato nei prossimi mesi, se si decidesse di realizzare un prodotto finito del modulo, descritto nell'attività di progetto C2.

Per quanto riguarda i prototipi dei moduli da impiegare per la realizzazione dell'apparecchio ENEA PLUS SENSE, sono state verificate le prestazioni fotometriche a seguito dell'intervento di sostituzione delle lenti, che si è reso necessario per riportare i dispositivi al rispetto delle specifiche di progetto inizialmente fissate. Un esemplare dell'intero prodotto, frutto dell'attività di progetto C1, è in fase di realizzazione da parte di una azienda partner di ENEA, e non è stato quindi possibile verificare l'interazione tra il light engine e la videocamera per l'acquisizione dei dati di traffico/presenza negli scenari applicativi individuati nel corso delle precedenti attività di progetto.

Non appena disponibile, si procederà alla verifica delle funzionalità nelle diverse applicazioni.

¹⁷ La fotometria prima della sostituzione delle lenti è stata assunta come riferimento

¹⁸ La differenza è probabilmente dovuta all'assemblaggio dei campioni e alla modificazione della distribuzione fotometrica delle lente stessa dovuta al diverso sistema di fissaggio sul MCPCB.

Allegati

Al presente report, sono allegati i seguenti file fotometrici:

- ENEA PLUS 2DN+2DW (SQUARE).ies
- ENEA PLUS 2DN+2DW (SQUARE).LDT
- ENEA PLUS 4DW SQUARE.ies
- ENEA PLUS 4DW SQUARE.LDT
- ENEA PLUS DN+DW (SQUARE).ies
- ENEA PLUS DN+DW (SQUARE).LDT
- ENEA PLUS DN_SQUARE.IES
- ENEA PLUS DN_SQUARE.LDT
- ENEA PLUS DW_SQUARE.IES
- ENEA PLUS DW_SQUARE.LDT



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