



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Caratterizzazione di impianti di illuminazione ai fini della
valutazione della luce dispersa verso l'alto
Rapporto integrato con i risultati delle misurazioni dall'alto

Giuseppe Rossi, Paola Iacomussi, Gianpaolo Scialpi



ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA

Report RdS/2012/084

CARATTERIZZAZIONE DI IMPIANTI DI ILLUMINAZIONE AI FINI DELLA VALUTAZIONE DELLA
LUCE DISPERSA VERSO L'ALTO

Rapporto integrato con i risultati delle misurazioni dall'alto

Paola Iacomussi, Giuseppe Rossi, Gianpaolo Scialpi(INRIM)

Mese e Anno: 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: STUDI E VALUTAZIONI SULL'USO RAZIONALE DELL'ENERGIA: Innovazione nella illuminazione pubblica: nuove tecnologie ed integrazione smart con altre reti di servizi energetici.

Responsabile del Progetto: Simonetta Fumagalli, ENEA

Il presente rapporto integra e sostituisce il precedente rapporto che non conteneva i risultati delle misurazioni eseguite dall'alto.



ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA

Paola Iacomussi, Giuseppe Rossi, Gianpaolo Scialpi

**CARATTERIZZAZIONE DI IMPIANTI DI ILLUMINAZIONE AI FINI DELLA
VALUTAZIONE DELLA LUCE DISPERSA VERSO L'ALTO**

RELAZIONE COMPRENSIVA DEI RISULTATI DELLE MISURAZIONI DALL'ALTO

Contratto di ricerca

**Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradali in
ambiente urbano ai fini della valutazione della luce dispersa verso l'alto**

ENEA Agenzia Nazionale Per Le Nuove Tecnologie

Paola Iacomussi

Giuseppe Rossi

Gianpaolo Scialpi

Sommario

1. Riassunto	1
2. Introduzione	2
2.1. Obiettivo della ricerca	2
3. Scelta delle tipologie di impianti e dei siti di misura	3
3.1. Impianti	3
3.2. Sito extraurbano	3
3.3. Sito urbano	5
3.4. Sito INRIM	7
4. Procedura di indagine sperimentale	10
5. Definizione delle misure illuminotecniche e delle condizioni di misura	11
5.1. Premessa	11
5.2. Misure su città	11
5.3. Definizione delle grandezze utili ai fini della valutazione dell'inquinamento luminoso degli impianti sperimentali.	13
5.4. Definizione delle misure illuminotecniche e delle condizioni di misura	14
5.5. Caratterizzazione dei campioni di apparecchi	16
6. Caratteristiche della piattaforma volante	17
7. Caratterizzazione degli apparecchi di illuminazione	20
7.1. Apparecchi e condizioni di misura	20
7.2. Apparecchio Philips con lampada a ioduri metallici e vetro piano	21
7.2.1. Flusso luminoso e parametri elettrici in funzione della tensione di alimentazione	21
7.2.2. Condizioni colorimetriche	24
7.3. Apparecchio Philips con lampada a ioduri metallici e vetro curvo	27
7.3.1. Flusso luminoso e parametri elettrici in funzione della tensione di alimentazione	27
7.3.2. Condizioni colorimetriche	30
7.4. Apparecchio Schreder con sorgente a LED e vetro piano	33
7.4.1. Flusso luminoso e parametri elettrici in funzione della tensione di alimentazione	33
7.4.2. Condizioni colorimetriche	36
7.5. Apparecchio Schreder con sorgente a LED e vetro curvo	39
7.5.1. Flusso luminoso e parametri elettrici in funzione della tensione di alimentazione	39
7.5.2. Condizioni colorimetriche	42
7.6. Flusso luminoso e parametri elettrici	45
8. Caratterizzazione degli impianti	48
8.1. Caratterizzazione secondo normativa	48
8.1.1. Impianti installati nel sito di Marcallo con Casone	49
8.1.2. Impianti installati nel sito INRIM	54
8.2. Caratterizzazione dall'alto	60
8.2.1. Impianti installati nel sito di Marcallo con Casone	60
8.2.2. Impianti installati nel sito INRIM	61
9. Risultati delle caratterizzazione degli impianti inrim dall'alto	67
9.1. Elaborazione delle acquisizioni	67
9.2. Ripartizione dell'intensità luminosa	68
9.3. Influenza degli edifici	75
10. Confronto tra gli impianti	76
11. Conclusioni	79
12. Bibliografia	79

1. RIASSUNTO

Nell'ambito del contratto di ricerca "Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradali in ambiente urbano ai fini della valutazione della luce dispersa verso l'alto" attivato dall'ENEA, l'INRIM ha svolto indagini per caratterizzare in laboratorio e sul campo le prestazioni di diverse tipologie di impianti di illuminazione, individuati in collaborazione con ENEA ed AIDI. In particolare sono state valutate le prestazioni fotometriche di impianti equipaggiati con apparecchi di illuminazione che rappresentano lo stato dell'arte tecnologico sia per le sorgenti utilizzate (ioduri metallici e LED) sia per la tipologia di chiusura (vetro piano e vetro curvo). I dati ottenuti permettono di individuare parametri di riferimento per quantificare la luce dispersa verso l'alto sia dal singolo apparecchio isolato nello spazio e dall'impianto. In quest'ultimo caso occorre considerare anche il contributo della luce riflessa dalle superfici illuminate e, in ambito urbano l'azione di schermo delle pareti verticali degli edifici.

Il presente rapporto integra e sostituisce il rapporto precedente con i risultati delle misurazioni eseguite dall'alto negli impianti allestiti presso l'INRIM. La prima parte (fino al capitolo 8) è sostanzialmente invariata rispetto a quella del precedente rapporto.

2. INTRODUZIONE

2.1. Obiettivo della ricerca

Gli obiettivi della ricerca sono:

- confrontare, a parità di caratteristiche prestazionali, l'impatto ambientale, dal punto di vista illuminotecnico, di diverse tipologie di impianti di illuminazione stradale;
- proporre parametri per la classificazione degli impianti riguardo alla luce dispersa verso l'alto (inquinamento luminoso) in base alle loro prestazioni normative e localizzazione sul campo;
- proporre un algoritmo di previsione dell'impatto ambientale, dal punto di vista illuminotecnico, di un impianto in base alle caratteristiche quantitative prima definite.

Seguendo le indicazioni della letteratura scientifica internazionale e in particolare quelle del comitato tecnico CIE TC4.21, un'analisi completa richiede lo studio sia di impianti di illuminazione non schermati da edifici (rurali) sia di impianti schermati dagli edifici (urbani).

L'attività relativa al contratto è svolta in sinergia tra INRIM, AIDI ed ENEA sotto il coordinamento e la supervisione di ENEA.

In particolare sono di specifica competenza INRIM:

- la definizione delle misure illuminotecniche e delle condizioni di misura,
- la caratterizzazione di campioni di apparecchi,
- la campagna di misura sulle installazioni prototipali (in ambiente rurale ed urbano) allestite da ENEA

L'analisi del sito e la valutazione della magnitudo limite è svolta in collaborazione con AIDI e la valutazione complessiva dei risultati è eseguita in sinergia con AIDI ed ENEA.

Inoltre considerate le difficoltà operative per le misure sul campo, eseguite in parte con piattaforma volante, si è deciso di approntare un sito di misura presso l'area esterna di INRIM.

3. SCELTA DELLE TIPOLOGIE DI IMPIANTI E DEI SITI DI MISURA

3.1. Impianti

Sono state individuate quattro diverse tipologie di apparecchi:

- con lampada a ioduri metallici e vetro curvo ottimizzato,
- con lampada a ioduri metallici e vetro piano,
- a LED e vetro curvo ottimizzato
- a LED e vetro piano.

Per limitare l'area di misura ogni impianto di illuminazione è composto da tre apparecchi dello stesso tipo montati su altrettanti pali telescopici mobili alti 8 m.

Per semplicità costruttiva e operativa, essendo i pali inclinabili per il montaggio – smontaggio degli apparecchi, non è stato previsto nessuno sbraccio e pertanto gli apparecchi sono stati montati allineati con il palo.

Ulteriori caratteristiche illuminotecniche degli impianti sono riportate nella relazione AIDI.

Per le misure eseguite presso INRIM (vedi §3.4) a causa degli spazi ristretti e considerando che le misurazioni dei parametri illuminotecnici normativi erano già state eseguite a Marcallo con Casone, si è operato con impianti composti da un solo apparecchio di illuminazione. Questa soluzione, appurato con le misure di Marcallo il soddisfacimento dei requisiti normativi degli impianti, permette di avere dati che, con la sovrapposizione degli effetti, possono essere generalizzati a impianti di ogni lunghezza.

3.2. Sito extraurbano

Per la caratterizzazione degli impianti sperimentali in ambito extraurbano, sfruttando a pieno le metodologie di acquisizione dei parametri dell'inquinamento luminoso, previste da INRIM è stata individuata, nel comune di Marcallo con Casone, la strada extraurbana a doppio senso di marcia sufficientemente isolata dall'abitato, per evitare disturbi da luci estranee, e con la presenza di strade alternative che ne permettono la chiusura al traffico, per il periodo delle prove, senza causare disagi di rilievo.

Le prove sono state eseguite a partire dalla rotonda di Via Lega Lombarda, in un tratto senza altri impianti di illuminazione (Figura 1 e Figura 2).

La presenza di un tratto rettilineo, senza alberi ai bordi, ha permesso l'installazione ad hoc di due impianti di illuminazione indipendenti, adeguatamente separati e accesi alternativamente.

Il sito extraurbano di Marcallo con Casone è denominato nel seguito "sito di installazione A".



Figura 1 Sito oggetto delle prove (A: via Lega Lombarda) Gli impianti prototipali sono stati realizzati nella parte alta della strada (contrassegnata dalla lettera M), per non essere influenzati dalle case limitrofe.



Figura 2 Sito oggetto delle prove di impianti di tipo extraurbano. Gli impianti di illuminazione sono stati installati, sul lato destro della carreggiata, nel tratto compreso tra gli alberi a sinistra e la bassa costruzione a destra.

3.3. **Sito urbano**

Per la caratterizzazione degli impianti sperimentali in ambito urbano è stata inizialmente individuata, nel comune di Marcallo con Casone, una strada (via Boccaccio) a scarso traffico presso il centro dell'abitato (Figura 3).

Si tratta di una strada che per la presenza di strade alternative può essere chiusa al traffico, per il periodo delle prove, senza causare disagi di rilievo; ma che presenta costruzioni di altezza modesta, spesso inferiori all'altezza stessa dei pali di illuminazione (Figura 4), e che quindi risulta poco significativa ai fini dell'indagine proposta.

Queste considerazioni, unite alle difficoltà operative, in spazi limitati, della piattaforma volante prevista per le misure fotometriche dall'alto (vedere §5) e alla necessità di consenso al sorvolo dei proprietari degli immobili hanno consigliato di svolgere tutte le prove di simulazione del sito urbano presso l'INRIM.



Figura 3 Sito originariamente previsto per le prove di tipo urbano (La strada è contrassegnata dalla lettera A).



Figura 4 Strada e impianto di illuminazione presente nel sito originariamente previsto per le prove di tipo urbano.

3.4. Sito INRIM

Valutate le difficoltà operative di misura con la piattaforma volante originariamente progettata dalla ditta Aerials Projects si è deciso di operare presso l'area esterna dell'INRIM, nella sede di strade delle Cacce in Torino .

Le difficoltà, dovute essenzialmente alla presenza di termiche, anche notturne, tipiche del periodo estivo, hanno consigliato per le successive misure il cambio della tipologia di piattaforma volante e contemporaneamente variazioni sulla procedura di misura per ottimizzare le possibilità operative del nuovo mezzo aereo (vedere §6).

Tra le zone disponibili in INRIM si è scelta quella prospiciente la palazzina centrale sia per la larghezza della carreggiata (pari a 18 m) sia per l'azione di schermatura svolta da una piantagione di alberi di alto fusto.

L'area prescelta permette inoltre di individuare la luminanza delle zone limitrofe alla tipica carreggiata di due corsie (larghezza di circa 7,5 m) sia sul lato destro ove si trova una zona asfaltata sia sul lato sinistro (posteriore rispetto all'apparecchio di illuminazione) ove la zona è un prato.

Il sito INRIM è denominato nel seguito "sito di installazione B".

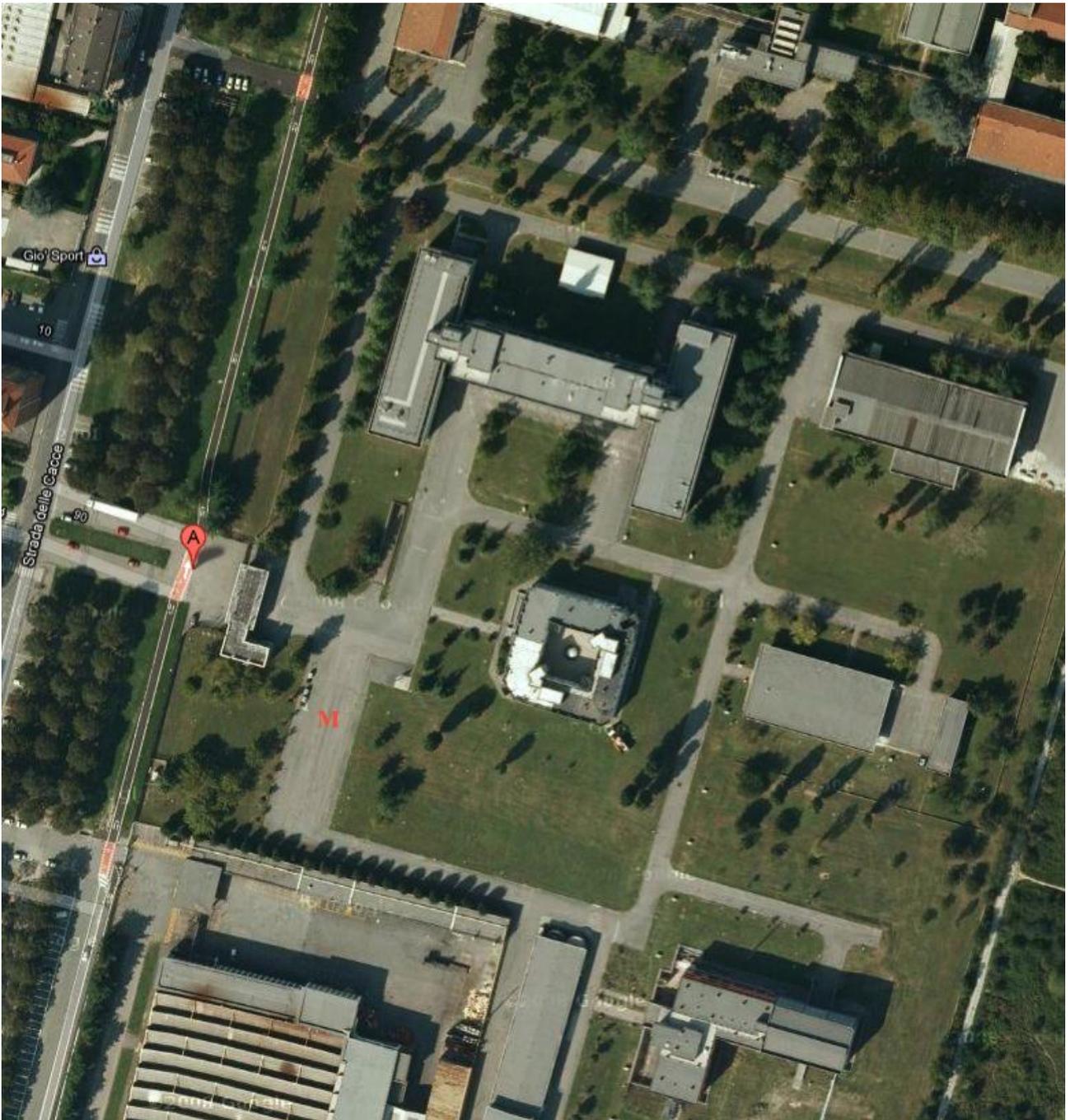


Figura 5 Vista parziale dell'area esterna dell'INRIM. La zona di misura è indicata con la lettera M.



Figura 6 Strada e impianto di illuminazione presente nel sito scelto presso la sede INRIM (Il primo palo a sinistra appartiene all'impianto fisso INRIM, spento durante le prove, il secondo è quello sperimentale).

4. PROCEDURA DI INDAGINE SPERIMENTALE

La procedura di indagine sperimentale consiste essenzialmente nei seguenti passi:
caratterizzazione in laboratorio degli apparecchi di illuminazione;
caratterizzazione dell'impianto (limitatamente alle grandezze elettriche di alimentazione e geometriche di installazione);
calcolo dell'illuminamento e della luminanza del manto stradale;
misurazione dell'illuminamento e della luminanza del manto stradale;
misura dall'alto della luminanza e dell'illuminamento prodotto dall'impianto;
calcolo della ripartizione della luminanza dell'impianto;
individuazione dei contributi dovuti alla radiazione emessa direttamente dagli apparecchi di illuminazione, dalla superficie della strada, delle altre zone illuminate;
calcolo della ripartizione dell'intensità luminosa dell'impianto;
definizione dei parametri utili al modello matematico per la valutazione dell'inquinamento luminoso (descritto nella relazione AIDI).

Il primo passo, note le caratteristiche in riflessione dell'asfalto illuminato, è necessario per stabilire l'accuratezza dei calcoli.

Il passo 2 permette di individuare le reali condizioni operative dell'impianto e di giustificare eventuali discrepanze tra i valori calcolati (al passo 3) e misurati (al passo 4).

Il passo 6 permette di conoscere le reali prestazioni dell'impianto e di avere indicazioni per i parametri del modello.

Il passo 7 permette di quantificare i parametri usati nei i passi successivi come descritto al §5.

Il passo 8 permette di caratterizzare l'impianto con il parametro tipico degli apparecchi di illuminazione e quindi con dati che possono essere facilmente gestiti da programmi di calcolo illuminotecnico.

L'ultimo passo esaurisce la caratterizzazione dell'impianto fornendo i dati utili al modello.

5. DEFINIZIONE DELLE MISURE ILLUMINOTECNICHE E DELLE CONDIZIONI DI MISURA

5.1. Premessa

Modelli matematici per la descrizione dell'inquinamento luminoso e la stima dell'incremento della luminanza della volta celeste dovuta alla presenza di impianti di illuminazione sono stati sviluppati da INRIM e verificati in più occasioni con misurazioni specifiche [1], [2], [3], [4], [5].

5.2. Misure su città

In particolare INRIM ha sviluppato, in passato, metodologie atte a caratterizzare grandi estensioni (ad esempio città) con misure di luminanza a distanza prese da rilievi vicini associate al conteggio, automatico, degli apparecchi visibili.

A partire dai dati fotometrici acquisiti, con una opportuna metodologia di analisi è possibile ottenere le seguenti grandezze di interesse:

- luminanza della città nella direzione di osservazione;
- intensità luminosa emessa dalla città nella direzione di osservazione;
- luminanza del cielo nella direzione di osservazione;
- intensità luminosa emessa dal cielo nella direzione di osservazione.

Indagini precedenti [6], [7] hanno dimostrato come l'emissione di una città sia assimilabile a quella di una sorgente isotropa (detta anche Lambertiana, per la quale la luminanza è uguale in tutte le direzioni di osservazione), Stante questa caratteristica è possibile calcolare il flusso luminoso o l'intensità luminosa emessa verso l'alto dalla città stessa partendo da poche misurazioni direzionali.

Fondamentale per la validità dei calcoli è la conoscenza del fattore di trasmissione atmosferica nell'istante di misura. Infatti a causa della non completa trasparenza dell'aria, la luce irradiata dalle sorgenti e superfici della città giunge attenuata nel sito di misura. Questo effetto è tanto più rilevante, quanto più la postazione di misura è distante dalla zona di emissione della radiazione.

Questo parametro può essere ottenuto anche con misure fotometriche, ad esempio valutando la luminanza di una data superficie (ad esempio campanile, piazza ecc.) da distanze diverse.

Per una sorgente lambertiana, l'intensità luminosa emessa I nella direzione θ risulta essere:

$$I = I_0 \cos \theta$$

ove:

I_0 è l'intensità emessa lungo la normale alla superficie della sorgente (allo Zenit nel nostro caso),

θ è l'angolo di emissione rispetto alla normale

Inoltre, per una superficie lambertiana, essendo la luminanza costante con l'angolo di osservazione, vale la relazione:

$$I_0 = L \, dA$$

ove, nel nostro caso:

L è la luminanza misurata della città,
 A l'area della superficie della città.

I_0 rappresenta l'intensità luminosa emessa dalla città, considerata come puntiforme, nella direzione zenitale. Nelle applicazioni pratiche, il considerare la città come un'areola concentrata facilita il calcolo dell'influenza della luce dispersa a grande distanza. In fase di misura è invece necessario ricorrere ad acquisizioni di luminanza, grandezza definita su una superficie estesa.

Nota l'intensità luminosa emessa verso l'alto, nella direzione normale alla superficie della città, il flusso luminoso disperso verso l'alto vale:

$$F_d = \int I dW = \int LA \cos J dW = \rho LA$$

ove:

Φ_d è il flusso luminoso disperso verso l'alto corrispondente al flusso associato alla luminanza L di una sorgente lambertiana avente estensione A , nel semispazio superiore.

Confrontando il valore ottenuto per il flusso luminoso disperso verso l'alto con il valore del flusso luminoso totale installato nella città, è possibile valutare il rapporto percentuale tra i due flussi.

Questo rapporto considera la dispersione verso l'alto della radiazione luminosa dell'intera città, quindi anche delle superfici illuminate e non solo quello direttamente emesso verso l'alto dagli apparecchi di illuminazione.

Considerando la città come una superficie illuminata dal flusso luminoso emesso da tutti gli apparecchi di illuminazione si può definire il fattore di riflessione della città come;

$$r = \frac{F_r}{F_i} = \frac{F_r}{F_{a,l}}$$

ove:

Φ_i è il flusso luminoso incidente sulla superficie, corrispondente, nel nostro caso, al flusso totale verso il basso emesso da tutti gli apparecchi di illuminazione $\Phi_{a,l}$.

Φ_r è il flusso luminoso riflesso dalla superficie illuminata.

Di più facile determinazione e di maggior utilità è il fattore di riflessione equivalente definito come:

$$r = \frac{F_d}{F_a}$$

ove:

Φ_d è il flusso luminoso totale disperso verso l'alto

Φ_a è il flusso luminoso totale di tutti gli apparecchi di illuminazione.

I due fattori coincidono nel caso di apparecchi di illuminazione con emissione nulla verso l'alto.

Volendo calcolare il flusso luminoso disperso verso l'alto imputabile esclusivamente all'emissione diretta degli apparecchi di illuminazione è necessario scorporare il contributo

delle superfici illuminate. Per fare ciò è necessario conoscere il fattore di riflessione medio delle superfici illuminate. Il suo valore può essere ipotizzato utilizzando dati disponibili in letteratura, oppure classificando i materiali presenti in città e valutandone l'estensione territoriale percentuale.

Noto il flusso luminoso disperso verso l'alto imputabile alla sola emissione diretta verso l'alto degli apparecchi di illuminazione, è possibile, con gli opportuni modelli matematici, stimare l'impatto di eventuali modifiche sistematiche delle caratteristiche degli impianti.

5.3. Definizione delle grandezze utili ai fini della valutazione dell'inquinamento luminoso degli impianti sperimentali.

La metodologia di misura descritta nel paragrafo precedente considera alcune approssimazioni che possono essere risolte e superate esclusivamente con indagini approfondite di su singoli impianti.

Una descrizione dettagliata del modello che si intende applicare nella presente indagine è presente nella relazione AIDI, alla quale si rimanda.

Per la simulazione di un impianto occorre conoscere:

- la ripartizione dell'intensità luminosa delle sorgenti in candele,
- le condizioni di installazione delle stesse,
- il coefficiente di luminanza q delle superfici illuminate, nelle direzioni di illuminazione e per ogni direzione di riflessione.

Mentre i primi dati sono facilmente reperibili, l'ultimo non è generalmente noto, con la necessaria completezza, per tutte le superfici presenti. Nel caso di superfici lambertiane può essere sostituito dal fattore di riflessione ρ .

Per caratterizzare l'impianto risulta pertanto preferibile individuare e misurare le frazioni di flusso coinvolte nel modello e le direzioni angolari ove queste frazioni sono indirizzate.

Eseguendo queste misure su un impianto tipo, è possibile ricavare i parametri specifici usati nel modello e procedere a semplificazioni che, combinando parametri facilmente misurabili a parametri calcolabili con adeguata accuratezza, permettano una realistica simulazione dell'impatto ambientale dell'impianto.

Con la metodologia che si propone l'impianto di illuminazione diventa, nel suo insieme, una sorgente di luce che può essere caratterizzata, in campo vicino, con la ripartizione della luminanza e a grande distanza, considerandola puntiforme, con la ripartizione dell'intensità luminosa.

Le misure devono coprire tutto l'emisfero superiore dell'impianto e possono considerare l'illuminamento in una griglia di punti o la luminanza osservata da questi punti.

In particolare la misura dell'illuminamento in un punto permette di conoscere il flusso luminoso incidente nel punto prodotto da tutto l'impianto, ma, a meno di operare a distanza proibitive, non permette di conoscere le direzioni di emissione di tale flusso.

La misura della luminanza eseguita con rivelatori a immagine (ILMD-Imaging Luminance Meter Device) permette invece di ottenere questa informazione indispensabile ai fini del modello. Si tratta pertanto di realizzare, sul campo, la caratterizzazione, denominata di campo vicino (near field), di un gigantesco apparecchio di illuminazione rappresentato dall'intero impianto, adattando le tecniche usate in laboratorio su apparecchi di illuminazione (Figura 7) ed usate da INRIM per la caratterizzazione degli apparecchi di illuminazione.

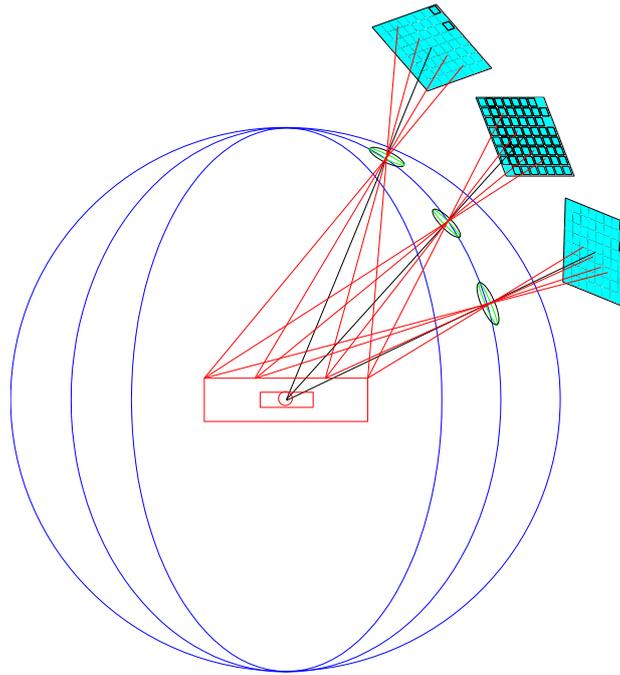


Figura 7 Misurazione in campo vicino di un apparecchio di illuminazione con ILMD. La superficie luminosa dell'apparecchio (in rosso al centro della sfera) viene misurata dall'ILMD (in turchese) preservando la conoscenza della direzione di emissione per via del sistema ottico (in verde).

Considerando le difficoltà operative sul campo, il metodo previsto da INRIM prevede in ogni caso la misurazione delle due grandezze contemporaneamente, usando le misure di illuminamento come verifica dell'accuratezza di quelle di luminanza e dei calcoli conseguenti.

5.4. Definizione delle misure illuminotecniche e delle condizioni di misura

Per le misure di caratterizzazione delle prestazioni normative dell'impianto [8] INRIM dispone di un apposito sistema di misura in grado di operare in modo dinamico [9], [10]. Considerando le finalità della ricerca si ritiene opportuno operare in modo statico con la stessa strumentazione.

Inoltre nel caso di accensione di un solo apparecchio sarà possibile misurare le caratteristiche in riflessione dell'asfalto, limitatamente alle condizioni angolari utili per la verifica dei calcoli illuminotecnici.

Per la valutazione del flusso luminoso disperso verso l'alto INRIM ha, in passato e come brevemente descritto al §5.2, sviluppato metodologie atte a caratterizzare grandi estensioni (ad esempio città) con misure a distanza prese da rilievi vicini. Per ovviare a quest'ultima limitazione era stato provato l'uso di elicotteri radiocomandati con carico utile di circa 5 kg, in volo stazionario a diverse quote.

Misure parziali su piccoli impianti sono state eseguite in passato con tecniche manuali e l'utilizzo di piattaforme aeree, comportando però lunghi tempi di acquisizione.

La possibilità di operare su un solo impianto di ridotte dimensioni completamente isolato permette una completa mappatura dell'illuminamento su una vasta area orizzontale sovrastante l'impianto e della luminanza da diverse direzioni angolari, parametro utile per individuare le direzioni di diffusione del flusso luminoso verso l'alto.

Si è pertanto deciso di eseguire misure su una superficie di circa 200 m di larghezza e di

100 di lunghezza (oltre la lunghezza dell'impianto) secondo lo schema di Figura 8.

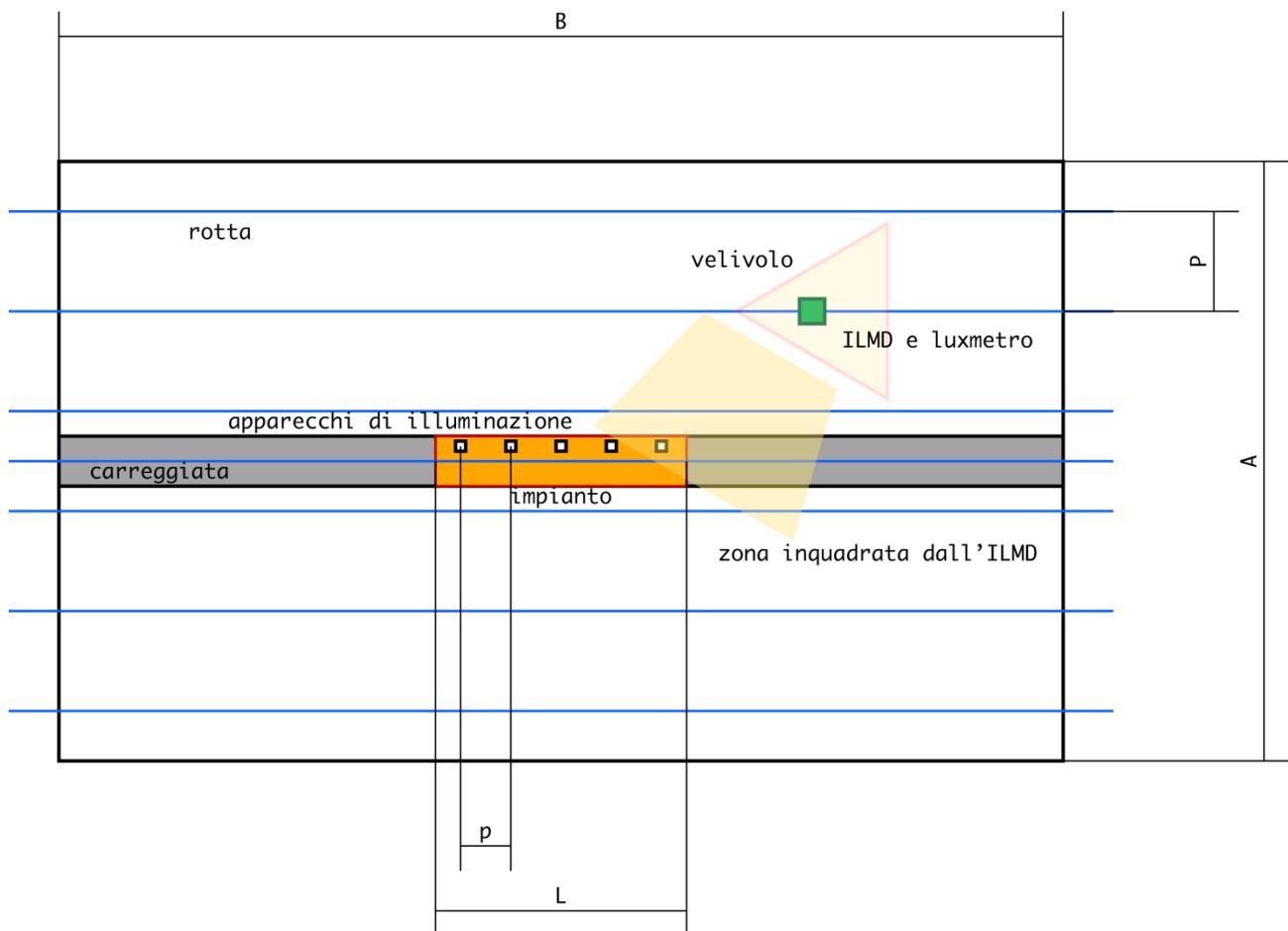


Figura 8 Visualizzazione delle condizioni di misura. A: larghezza della zona misurata, B: lunghezza della zona misurata, L: lunghezza dell'impianto, p: interdistanza tra gli apparecchi di illuminazione, P: passo tra le rotte percorse dal velivolo.

IL sistema di misura viene ruotato durante la traslazione del velivolo in modo da coprire le direzioni angolari di interesse. La quota di misura è di circa 25 m in modo da limitare al minimo le direzioni angolari che non risultano coperte.

In queste condizioni l'uso dell'elicottero radiocomandato si è rilevato impossibile per le difficoltà di controllo della posizione e dell'assetto di un velivolo potenzialmente al buio e relativamente piccolo rispetto alla distanza di visione del pilota.

Per queste ragioni con la ditta Aerials Projects sono state valutate soluzioni alternative e si è deciso di utilizzare un prototipo a vela che permette basse velocità di movimentazione unite a una buona manovrabilità e controllo della quota.

Una serie di prove presso l'aeroporto Varese dell'aero club Adele Orsi hanno dimostrato la fattibilità del progetto, ma contemporaneamente hanno evidenziato la necessità di operare con aria estremamente calma.

Durante la prima campagna di misura, nel sito di Marcallo, per le condizioni atmosferiche non ideali, il sistema è risultato troppo instabile e di complessa manovrabilità, tanto da consigliare di non effettuare ulteriori voli, oltre al primo.

Pertanto si è deciso di proseguire le misure nel sito dell'INRIM con dimensioni della zona

misurata inferiori e con l'uso di un elicottero radiocomandato.

Le misure secondo normativa dell'impianto, integrate dai rilievi dall'alto, permettono di quantificare le frazioni di flusso luminoso disperse dall'impianto verso l'alto e il comportamento energetico dello stesso come rapporto tra parametri relativi alle prestazioni illuminotecniche, parametri relativi all'inquinamento luminoso e/o il flusso luminoso installato e potenza elettrica assorbita.

I dati sperimentali, così ottenuti possono essere utilizzati in simulazioni numeriche per individuare il contributo dell'impianto alla magnitudo limite e contemporaneamente per confermare il modello matematico che stima il contributo all'inquinamento luminoso dell'impianto.

5.5. Caratterizzazione dei campioni di apparecchi

Per ogni tipologia di apparecchio selezionata, il campione fornito da ENEA è stato sottoposto a verifiche fotometriche ed elettriche. Essendo necessaria una caratterizzazione esaustiva rispetto a quella richiesta dall'attuale normativa stradale, INRIM ha predisposto una metodologia di misura ad hoc per individuare tutti i parametri adatti alla sperimentazione, considerando le limitazioni previste dalla normativa [12].

In particolare l'apparecchio di illuminazione è stato misurato in laboratorio alla temperatura ambiente di riferimento adottata in fotometria (25°C) e alla tensione di alimentazione nominale, determinando:

- il flusso luminoso emesso (in lumen),
- le frazioni di flusso luminoso emesse in definite direzioni,
- la ripartizione dell'intensità luminosa (in candele) con angolo γ tra 0° e 175°,
- la radianza spettrale (in unità relative),
- i parametri elettrici di alimentazione,
- la temperatura di colore correlata,
- l'indice di resa dei colori,
- l'efficienze luminosa come rapporto tra il flusso luminoso emesso nel semispazio inferiore e la potenza totale assorbita, intendendo con quest'ultima la potenza elettrica reale assorbita dall'apparecchio di illuminazione compresi tutti i suoi componenti.

Inoltre il flusso luminoso emesso l'apparecchio e i parametri elettrici di alimentazione sono stati misurati nell'intervallo di tensioni di alimentazione tra 202 V e 232 V (riduzione del 10% rispetto al valore nominale).

I dati raccolti permettono di stimare con elevata accuratezza il comportamento reale dell'apparecchio sul campo.

6. CARATTERISTICHE DELLA PIATTAFORMA VOLANTE

Al fine di eseguire le misurazioni di luminanza e di illuminamento dall'alto, dopo un'indagine di mercato è stata incaricata la ditta Aerials Projects di Cassani Marco affinché provvedesse a tutte le fasi di preparazione e gestione di una piattaforma volante radioguidata adeguata alla metodologia di misura e alle condizioni operative definite da INRIM.

La natura dei sensori fotometrici e le peculiari condizioni ambientali in cui si sarebbero effettuati i voli (dopo il tramonto, in condizioni di buio, considerata anche la mancanza della radiazione lunare e di possibile abbagliamento per l'operatore che deve osservare il velivolo da terra) ha consigliato all'allestimento di due tipologie di piattaforme volanti, progettate e realizzate in proprio da Aerials Projects:

- un paramotore appositamente progettato e costruito per il volo a bassa velocità e in condizioni di scarsa visibilità;
- un elicottero appositamente modificato ed attrezzato.

Per il paramotore sono stati valutati due prototipi per sperimentare, nella ricerca della miglior soluzione possibile, due tipi di propulsione: termica ed elettrica.

La scelta del paramotore, anziché qualunque altro tipo di velivolo, è stata dettata principalmente dall'esigenza di assicurarne la visibilità notturna e quindi il controllo lungo la distanza su cui si sarebbe sviluppato il percorso sopra l'impianto di illuminazione oggetto delle misure (circa 200 m).

Il modello operativo definitivo, derivato dal secondo prototipo, ha una massa complessiva al decollo di 19 kg, monta un motore elettrico erogante 4500 W di potenza massima, ed è alimentato da batterie di tipo Li-po, con cui raggiunge un'autonomia operativa di circa 20 min.



Figura 9 Il paramotore durante un volo di prova diurno.



Figura 10 Il paramotore durante un volo di prova crepuscolare. Si notano le strisce luminose atte a valutare l'assetto del velivolo durante il volo.

La struttura è interamente realizzata con materiale aeronautico (alluminio e ferramenta) lavorato sia a mano, sia con macchine CNC.

L'ala di tipo flexifoil ha una superficie di circa 8 m^2 con un'apertura di circa 6 m.

Un sistema dedicato di illuminazione rende il paramotore visibile al pilota in ogni assetto, senza comunque interferire con le letture dei sensori fotometrici presenti a bordo.

Cuore del progetto, attorno al quale è poi stata sviluppata la struttura del paracarrello, è stato il supporto appositamente progettato e realizzato da Aerials Projects, per la gestione (sostegno, brandeggio e stabilizzazione) dei sensori fotometrici trasportati. La specifica richiede infatti che il luxmetro rimanga orizzontale e il luminanzometro ILMD punti verso l'impianto di illuminazione

Per le acquisizioni in ambito urbano e presso l'INRIM si sono attrezzati appositamente 2 elicotteri (dei quali uno di prova/riserva).

Le meccaniche in oggetto sono state allestite partendo da prodotti presenti in commercio ed adattate all'uso specifico.

Tali modifiche consistono essenzialmente in un sistema dedicato di illuminazione tale da rendere gli elicotteri visibili al pilota in ogni assetto, senza interferire con gli apparati di misura e nella scelta di adeguati rapporti di riduzione del gruppo motore/rotore per aumentare la capacità di carico.

Inoltre, per la massima riduzione di peso della struttura a favore del payload imbarcato, è stato usato carbonio lavorato CNC per il supporto dei sistemi di misura e per altri particolari meccanici.

I motori montati sono termici con potenze erogate di 2,5 e 4 hp, i rotori principali hanno il diametro di 1,5 m e 1,8 m ed il peso al decollo di tali elicotteri (equipaggiati) è rispettivamente di 7 kg e 12,5 kg.

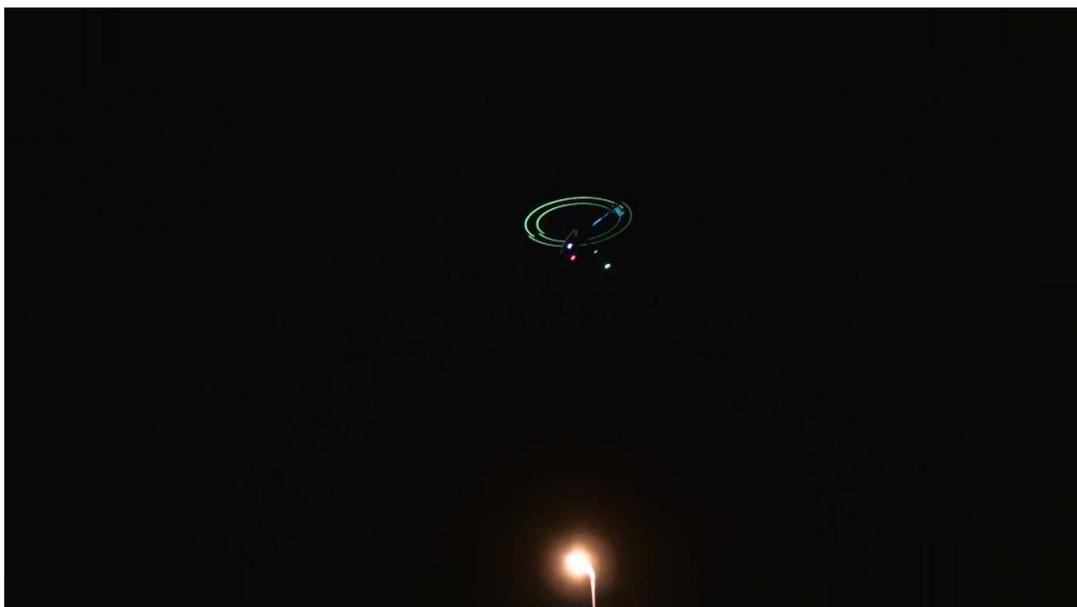


Figura 11 L'elicottero di riserva in volo notturno di verifica della ripetibilità del sistema di stabilizzazione del gruppo sensori fotometrici.

7. CARATTERIZZAZIONE DEGLI APPARECCHI DI ILLUMINAZIONE

7.1. Apparecchi e condizioni di misura

ENEA ha consegnato a INRIM 4 apparecchi di illuminazione, uno per ogni tipologia scelta come da Tabella 1.

Ogni apparecchio è stato numerato al fine di permetterne l'identificazione senza ambiguità.

Altri 5 apparecchi, per ogni tipologia scelta sono stati approntati da ENEA per la realizzazione degli impianti.

Gli apparecchi caratterizzati in laboratorio hanno avuto un invecchiamento, oltre a quello previsto da ENEA, di 400 h, con periodi di accensione di 8 h intervallati da 20 min di spegnimento. Al termine dell'invecchiamento si è deciso di usare la stessa lampada per caratterizzare i due apparecchi con sorgente agli ioduri metallici, in quanto una manifestava una instabilità troppo elevata rispetto alle aspettative e questa scelta avrebbe consentito il confronto tra le prestazioni dei due apparecchi con maggior accuratezza.

Tabella 1 Elenco degli apparecchi di illuminazione oggetto della caratterizzazione fotometrica.

Apparecchi o di illuminazione				
Costruttore	PHILIPS		SCHREDER	
Sorgente luminosa	Ioduri Metallici		LED	
Tipologia vetro	Pi ano	Cur vo	Pi ano	Cur vo
Modello	SGS253	SGS253	SENSO2	SENSO2
Codice INRIM	8258	8259	8260	8261
Dati di targa	CPO-T90W 728 ta = 35 °C	CPO-T90W 728 ta = 35 °C	96 LEDS 4500K ta = 30 °C	96 LEDS 4500K ta = 30 °C

Tutte le misurazioni sono state eseguite con gli apparecchi installati come previsto dal costruttore, su supporto INRIM.

L'allineamento degli apparecchi rispetto al sistema di coordinate di misura è avvenuto facendo riferimento agli assi del supporto (le incertezze di misura dichiarate tengono conto della tolleranza di allineamento di quest'ultimo). Per quanto possibile si è cercato di mantenere la superficie di emissione dell'apparecchio orizzontale. Per le caratteristiche costruttive degli apparecchi si stima, per questo parametro, una incertezza pari a 0,5 °.

Le prove sono state eseguite seguendo le raccomandazioni della norma UNI EN 13032-01 [11] e UNI 11356 [12].

Tutta la strumentazione usata è stata preventivamente tarata con riferimento ai campioni nazionali.

Le variazioni nel comportamento degli apparecchi con le condizioni di alimentazione sono state misurate nel campo di tensioni da 202 V a 232 V.

La misurazione è avvenuta con apparecchio stabilizzato per 3 ore alla tensione di 230 V e successivamente, senza spegnerlo, alle sedici tensioni di prova per periodi di 120 min, partendo da 202 V e proseguendo con tensioni crescenti.

Successivamente sono stati calcolati i valori medi delle grandezze considerate ottenuti sul

periodo finale di 115 min, per ogni tensione di alimentazione prevista. Pertanto nel calcolo del valore medio non sono stati considerati i primi 5 min, ritenuti periodo massimo per raggiungere condizioni di stabilizzazione dell'apparecchio nella nuova condizione di alimentazione.

L'efficienza luminosa è stata calcolata considerando il solo flusso luminoso emesso nel semispazio inferiore, essendo il solo utile ai fini dell'illuminazione stradale.

La caratterizzazione spettro-colorimetrica dello spettro di emissione è stata ottenuta per i due piani principali (C0-180 e C90-270) del sistema di coordinate C_{γ} . Dallo spettro di emissione sono state calcolate le coordinate tricromatiche, la temperatura correlata di colore e l'indice di resa dei colori.

7.2. Apparecchio Philips con lampada a ioduri metallici e vetro piano

7.2.1. Flusso luminoso e parametri elettrici in funzione della tensione di alimentazione

Nella

Figura 12 è riportata la variazione del flusso luminoso emesso in funzione della tensione di alimentazione. Le variazioni sono inferiori all'incertezza di misura del flusso luminoso dichiarata al valore nominale di alimentazione.

La

Figura 13 descrive la variazione della potenza elettrica assorbita nelle stesse condizioni operative, la Figura 14 considera il fattore di potenza e la Figura 15 la corrente assorbita.

La Figura 16 descrive la variazione dell'efficienza luminosa in funzione della tensione di alimentazione.

Le variazioni con la tensione di alimentazione delle prestazioni fotometriche ed elettriche dell'apparecchio di illuminazione sono contenute risultando trascurabili nella pratica illuminotecnica.

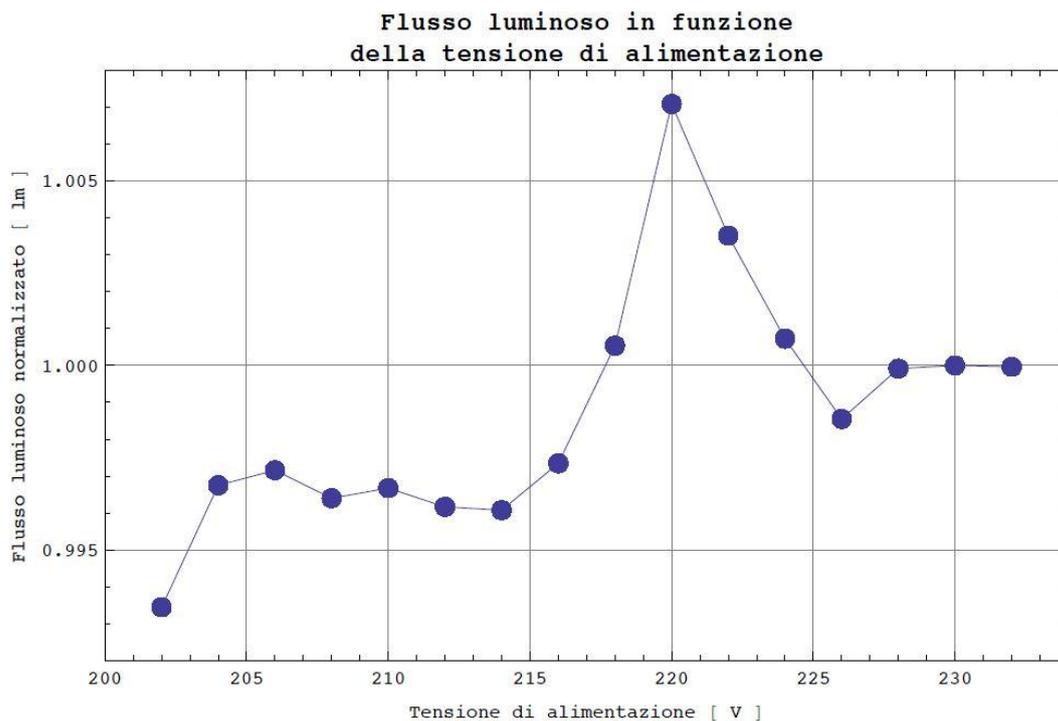


Figura 12 Variazione del flusso luminoso (normalizzato) emesso dall'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

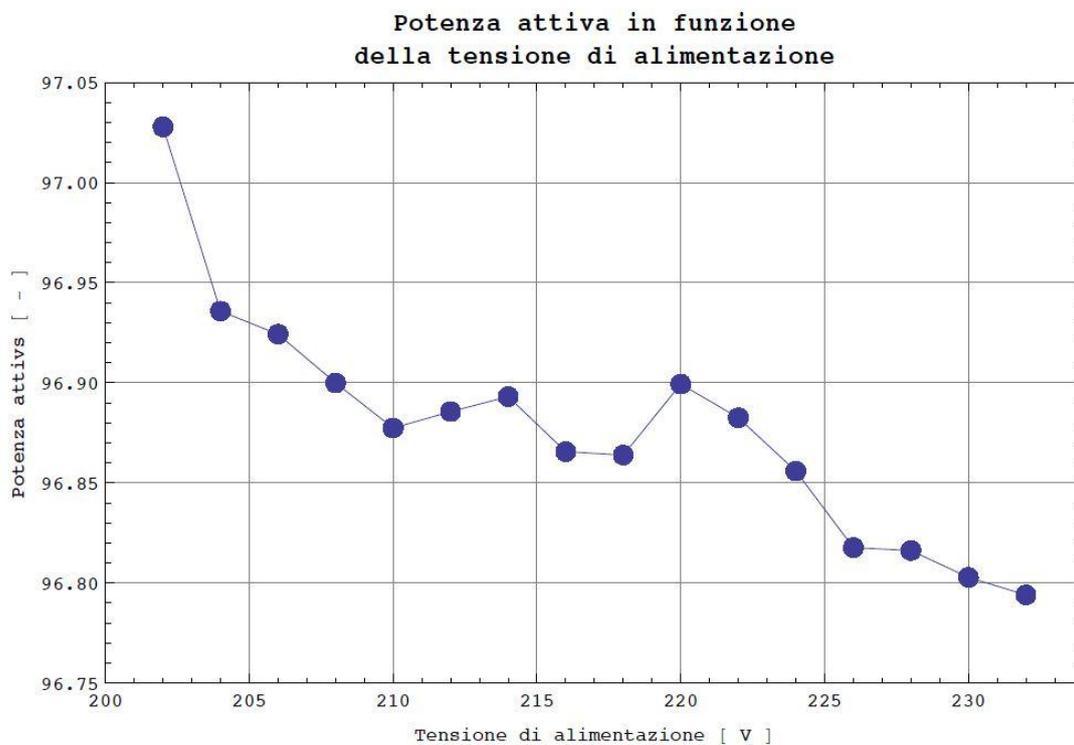


Figura 13 Variazione della potenza attiva assorbita dall'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

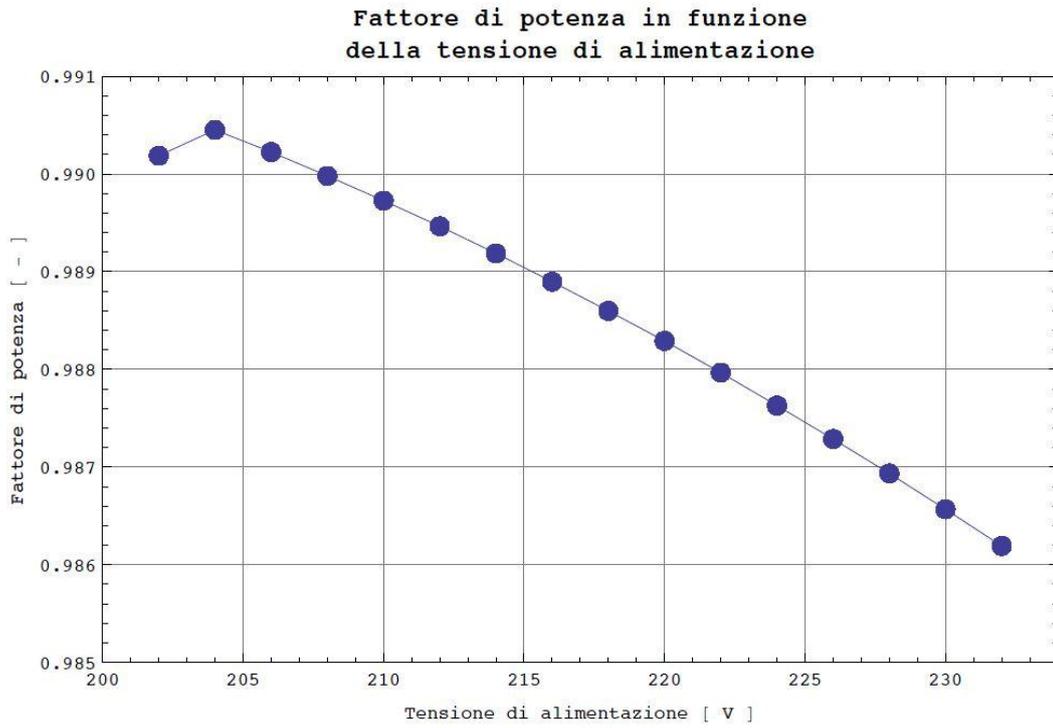


Figura 14 Variazione del fattore di potenza elettrica dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

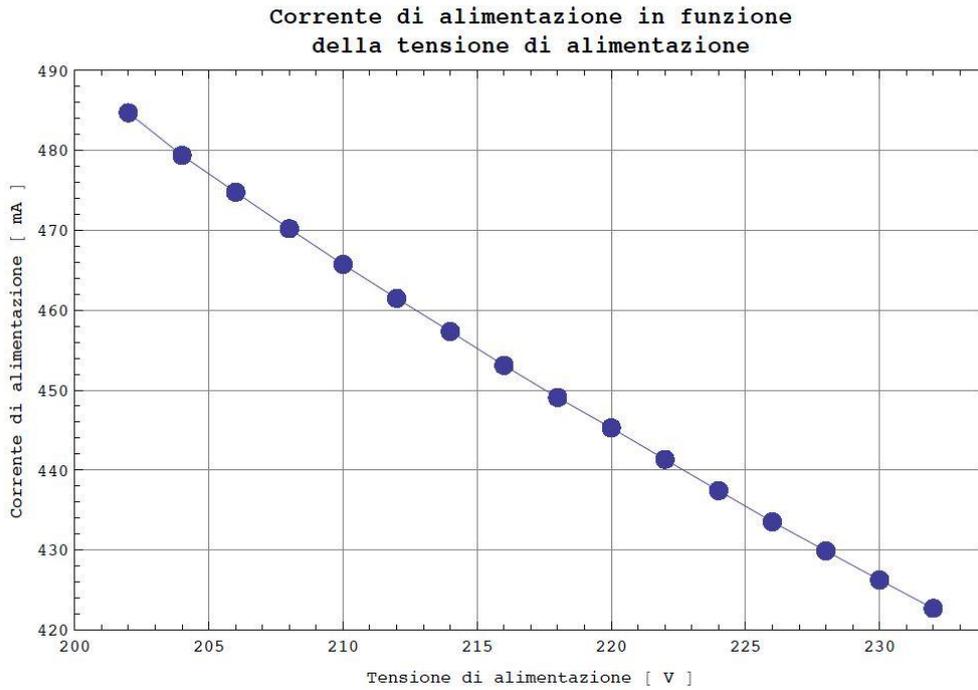


Figura 15 Variazione della corrente di alimentazione dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

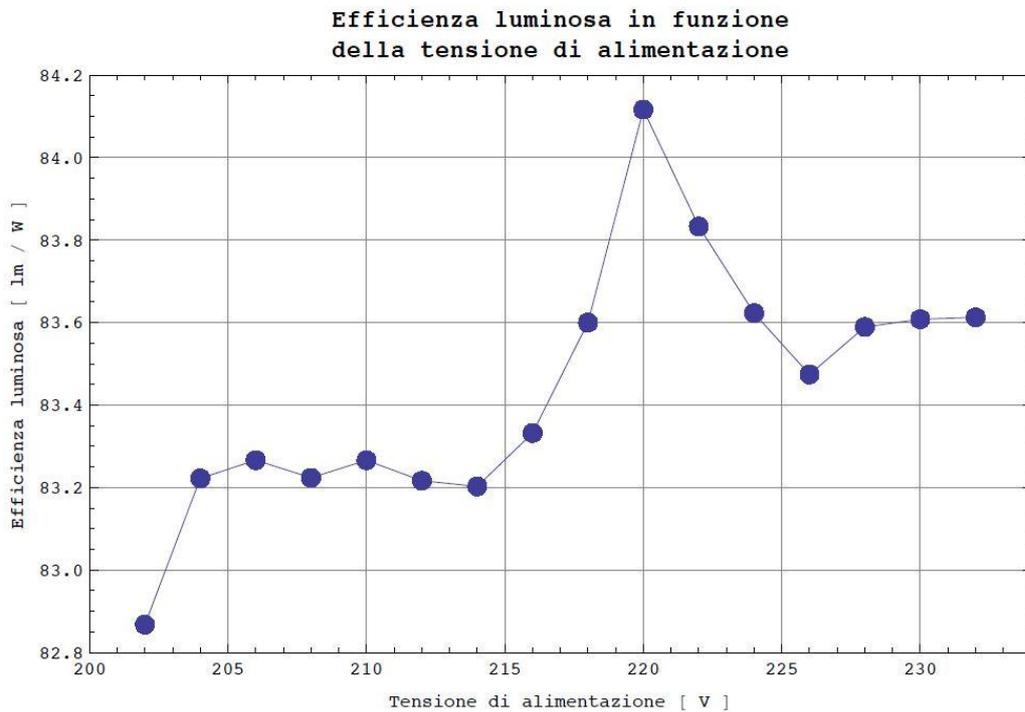


Figura 16 Variazione dell'efficienza luminosa dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

7.2.2. Condizioni colorimetriche

Nella Tabella 2 sono riassunti i parametri colorimetrici calcolati dalla distribuzione spettrale della radiazione emessa dalla sorgente agli angoli del sistema di coordinate $C\gamma$ specificati.

I grafici da Figura 17 a Figura 20 riportano l'andamento della distribuzione spettrale normalizzata in funzione degli angoli di misura.

Tabella 2 Tabella riassuntiva delle prestazioni colorimetriche misurate per l'apparecchio.

Piano C	Angolo ϑ	Coordinate tricromatiche		Temperatura di colore prossima	Indice di resa dei colori			
		x	y		Ra			
					Temperatura di colore prossima della sorgente di riferimento			
		[°]	[-]		[-]	[K]	3000 K	3500 K
0,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,438 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
0,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,438 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
0,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,437 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	63 ± 1
0,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,438 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
0,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,438 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
0,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,437 ± 0,008	0,414 ± 0,008	3100 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	63 ± 1
0,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,437 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	63 ± 1
0,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,437 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	63 ± 1
0,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,437 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	63 ± 1
90,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,438 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
90,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,438 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
90,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,440 ± 0,008	0,416 ± 0,008	3000 ± 100	60 ± 1	69 ± 1	73 ± 1	61 ± 1
90,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,440 ± 0,008	0,416 ± 0,008	3100 ± 100	60 ± 1	69 ± 1	73 ± 1	61 ± 1
90,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,438 ± 0,008	0,416 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
90,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,437 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	63 ± 1
90,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,436 ± 0,008	0,414 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	63 ± 1
90,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,436 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	62 ± 1	71 ± 1	75 ± 1	64 ± 1
90,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,437 ± 0,008	0,418 ± 0,008	3100 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	75 ± 1	65 ± 1
180,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,439 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
180,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,439 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
180,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,439 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
180,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,439 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3000 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
180,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,439 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
180,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,439 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3100 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
180,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,439 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3000 ± 100	61 ± 1	69 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
180,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,440 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3000 ± 100	61 ± 1	69 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
180,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,441 ± 0,008	0,416 ± 0,008	3000 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
270,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,440 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3000 ± 100	61 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
270,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,439 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3000 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	63 ± 1
270,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,440 ± 0,008	0,414 ± 0,008	3000 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	63 ± 1
270,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,440 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3000 ± 100	62 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	63 ± 1
270,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,439 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3000 ± 100	62 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	63 ± 1
270,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,439 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3000 ± 100	62 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	63 ± 1

Distribuzione spettrale relativa nelle direzioni angolari specificate

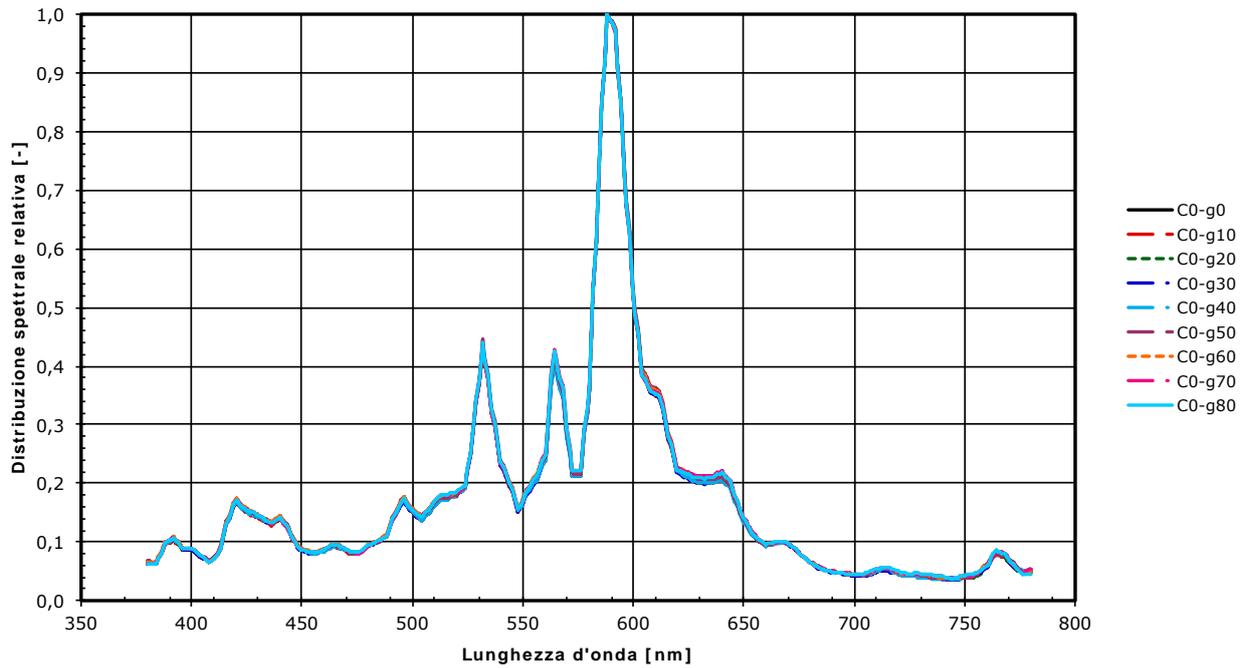


Figura 17 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C0).

Distribuzione spettrale relativa nelle direzioni angolari specificate

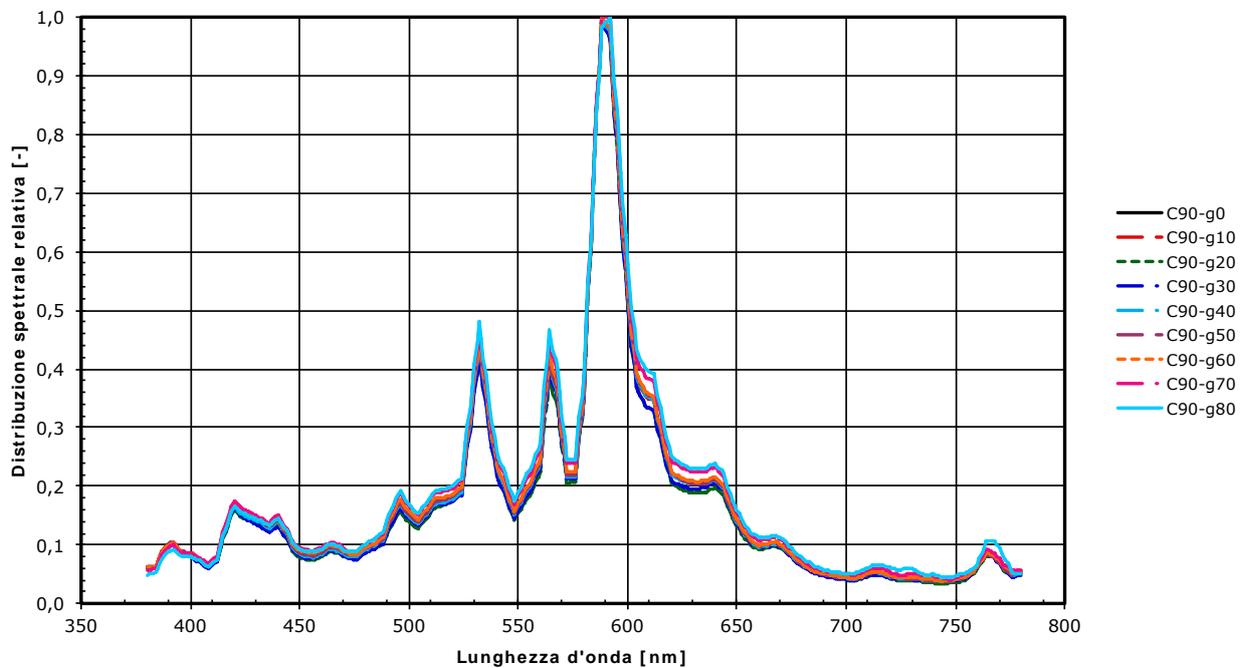


Figura 18 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C90).

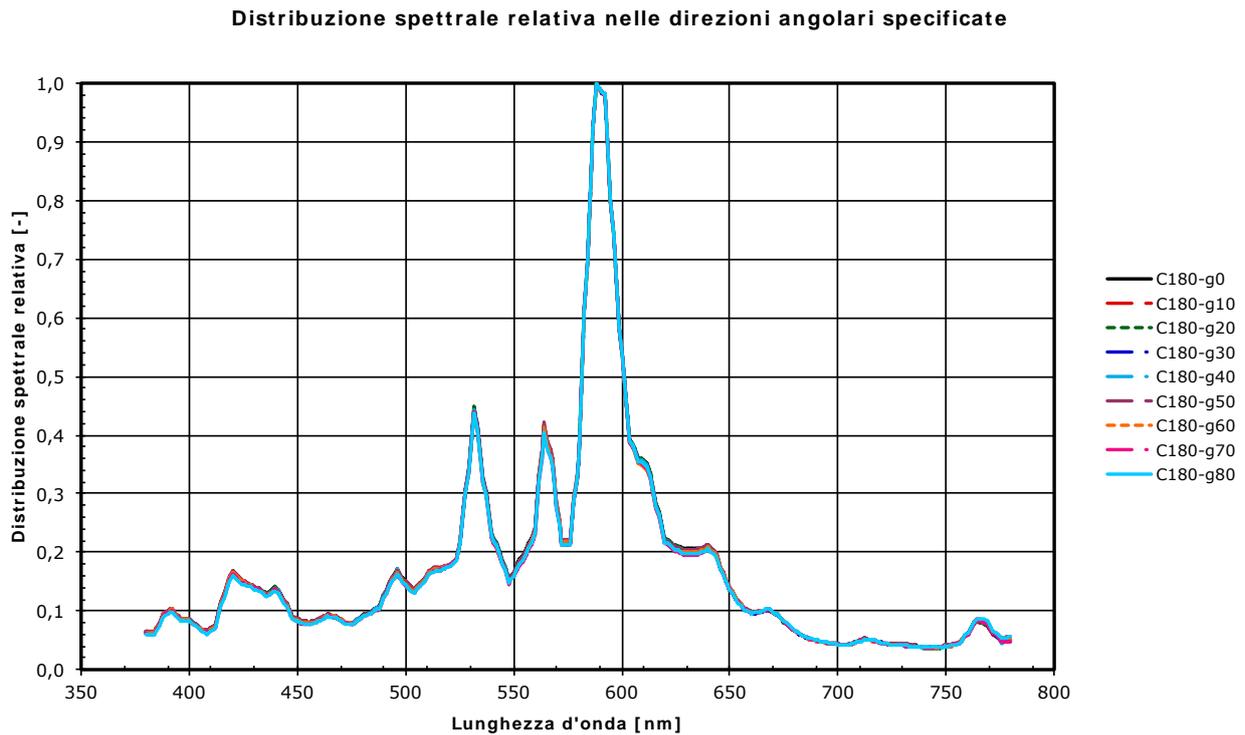


Figura 19 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C180).

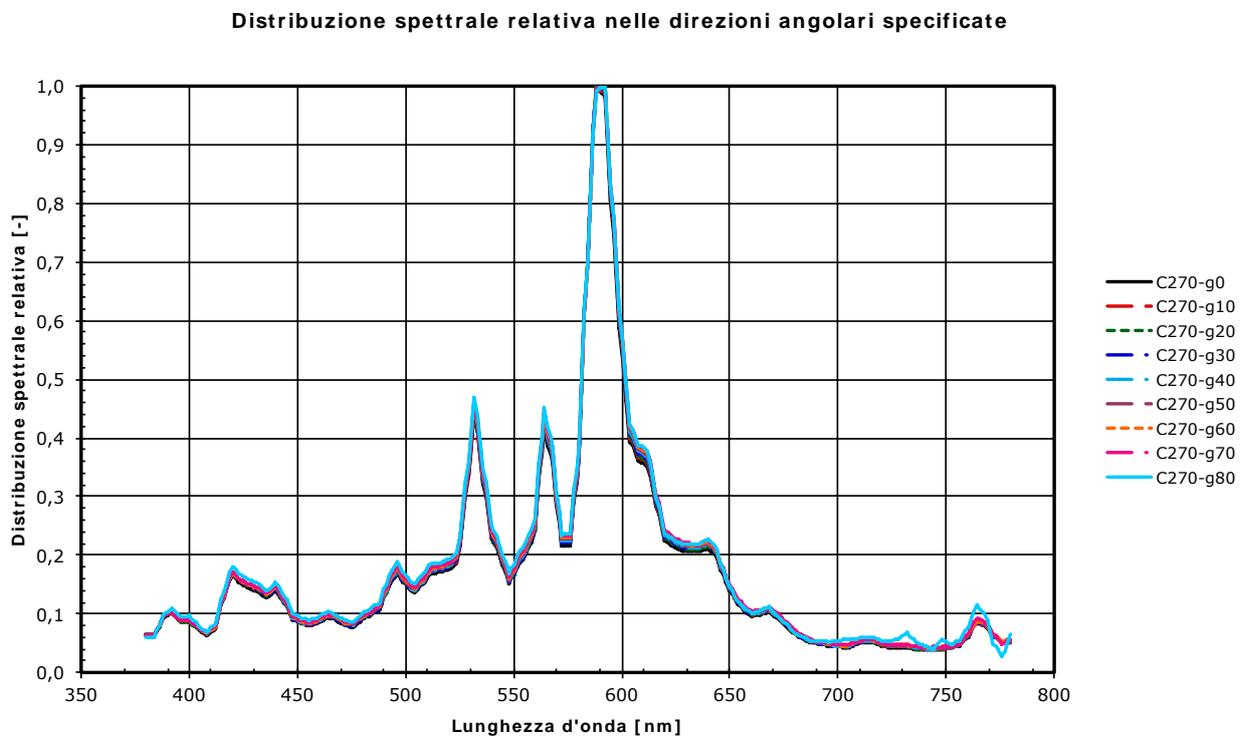


Figura 20 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C270).

7.3. Apparecchio Philips con lampada a ioduri metallici e vetro curvo

7.3.1. Flusso luminoso e parametri elettrici in funzione della tensione di alimentazione

Nella Figura 21 è riportata la variazione del flusso luminoso emesso in funzione della tensione di alimentazione. Le variazioni sono inferiori all'incertezza di misura del flusso luminoso dichiarata al valore nominale di alimentazione.

La

Figura 22 descrive la variazione della potenza elettrica assorbita nelle stesse condizioni operative, la

Figura 23 considera il fattore di potenza e la Figura 24 la corrente assorbita.

La Figura 25 descrive la variazione dell'efficienza luminosa in funzione della tensione di alimentazione.

Le variazioni con la tensione di alimentazione delle prestazioni fotometriche ed elettriche dell'apparecchio di illuminazione sono contenute risultando trascurabili nella pratica illuminotecnica.

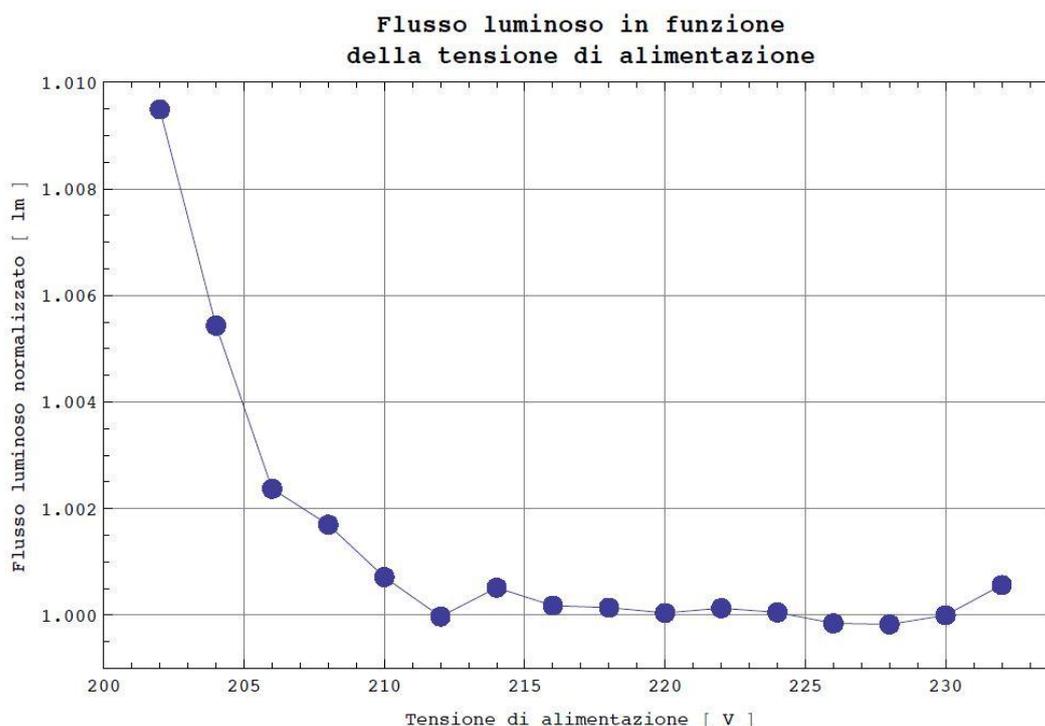


Figura 21 Variazione del flusso luminoso (normalizzato) emesso dall'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

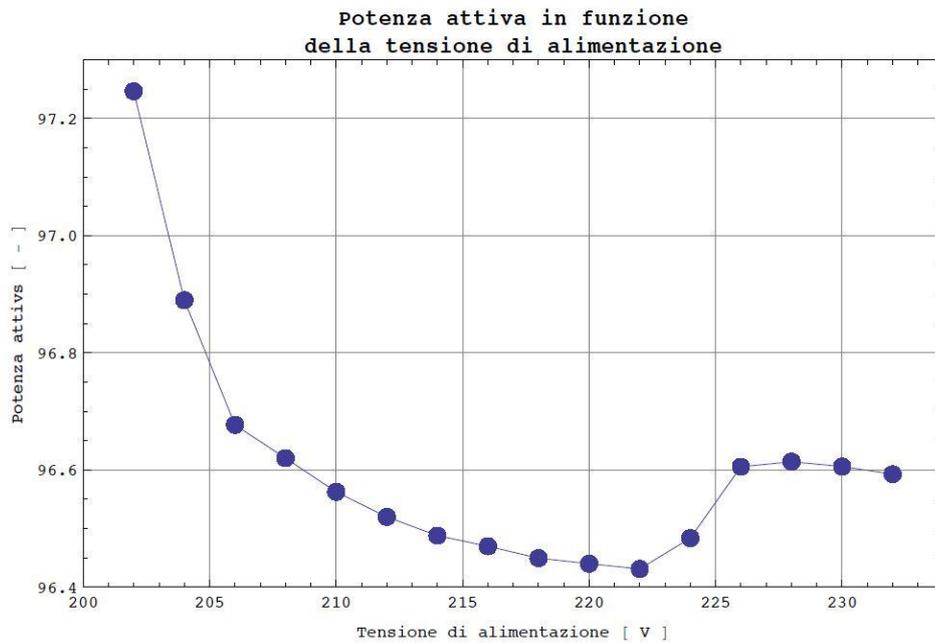


Figura 22 Variazione della potenza attiva assorbita dall'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

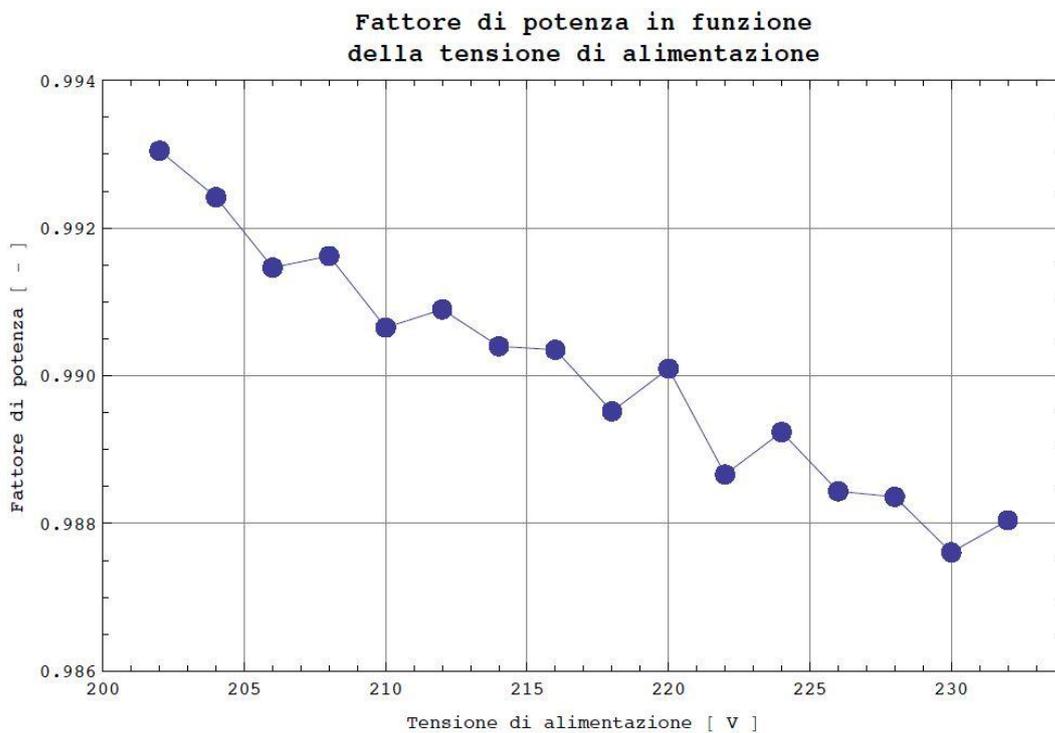


Figura 23 Variazione del fattore di potenza elettrico dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

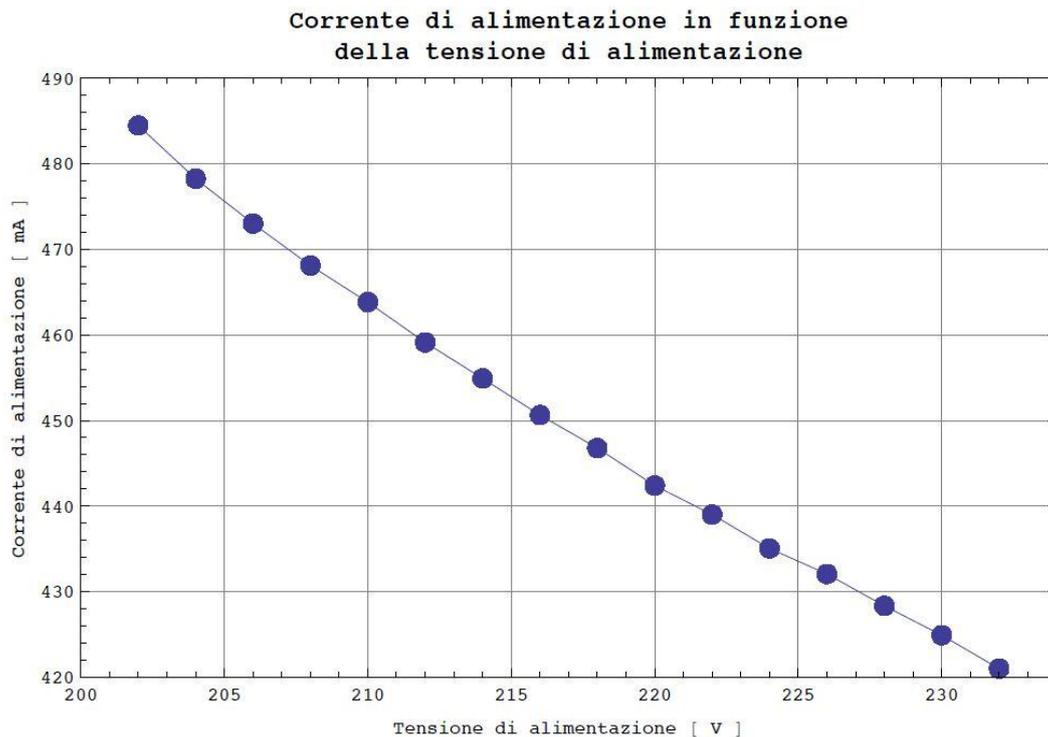


Figura 24 Variazione della corrente di alimentazione dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

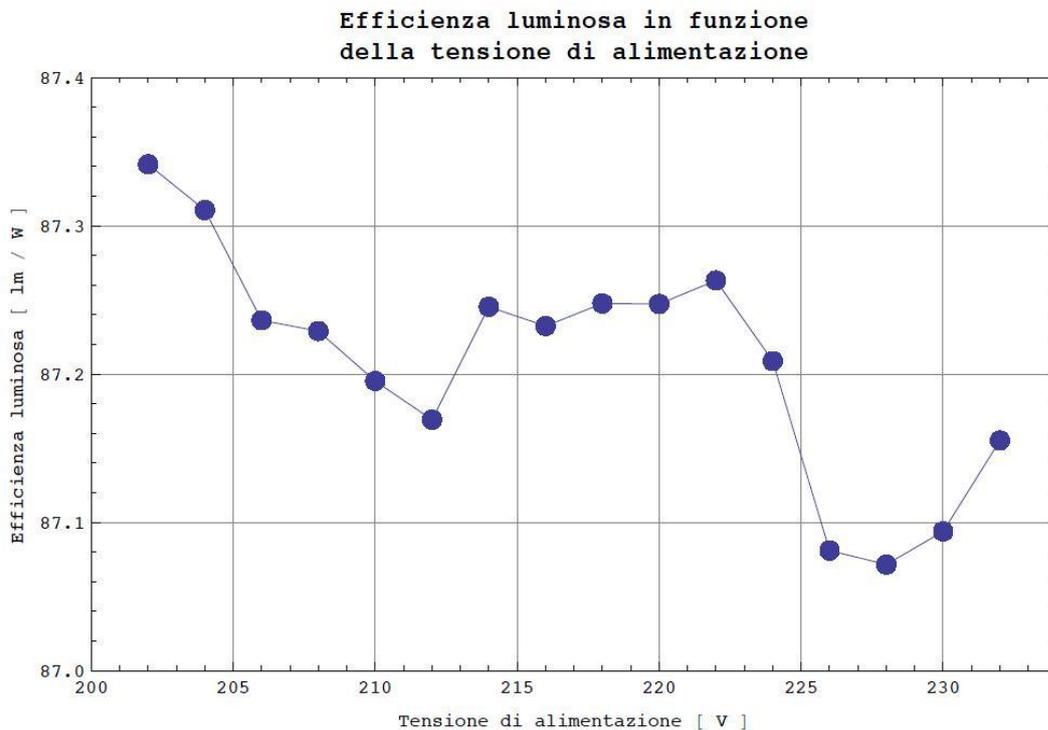


Figura 25 Variazione dell'efficienza luminosa dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

7.3.2. Condizioni colorimetriche

Nella Tabella 3 sono riassunti i parametri colorimetrici calcolati dalla distribuzione spettrale della radiazione emessa dalla sorgente agli angoli del sistema di coordinate $C\gamma$ specificati.

I grafici da Figura 26 a Figura 29 riportano l'andamento della distribuzione spettrale normalizzata in funzione degli angoli di misura.

Tabella 3 Tabella riassuntiva delle prestazioni colorimetriche misurate per l'apparecchio.

Piano C	Angolo ϑ	Coordinate tricromatiche		Temperatura di colore prossima	Indice di resa dei colori			
		x	y		Ra			
					Temperatura di colore prossima della sorgente di riferimento			
		[°]	[-]		[-]	[K]	3000 K	3500 K
0,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
0,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,416 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
0,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,416 ± 0,008	3 000 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
0,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,416 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
0,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3 000 ± 100	62 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
0,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3 000 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
0,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3 000 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
0,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,416 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	61 ± 1
0,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,443 ± 0,008	0,414 ± 0,008	3 000 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	62 ± 1
90,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
90,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,416 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	61 ± 1
90,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,448 ± 0,008	0,416 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	60 ± 1
90,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,448 ± 0,008	0,416 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	60 ± 1
90,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,416 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	61 ± 1
90,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3 000 ± 100	62 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
90,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,443 ± 0,008	0,414 ± 0,008	3 000 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
90,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,417 ± 0,008	3 000 ± 100	64 ± 1	72 ± 1	75 ± 1	63 ± 1
90,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,418 ± 0,008	3 000 ± 100	64 ± 1	72 ± 1	75 ± 1	63 ± 1
180,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
180,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,416 ± 0,008	3 000 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
180,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,416 ± 0,008	3 000 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
180,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
180,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,416 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	70 ± 1	73 ± 1	61 ± 1
180,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	62 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	61 ± 1
180,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
180,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
180,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,444 ± 0,008	0,414 ± 0,008	3 000 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
270,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,446 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
270,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
270,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
270,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,415 ± 0,008	2 900 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
270,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3 000 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	62 ± 1
270,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,445 ± 0,008	0,415 ± 0,008	3 000 ± 100	63 ± 1	71 ± 1	74 ± 1	62 ± 1

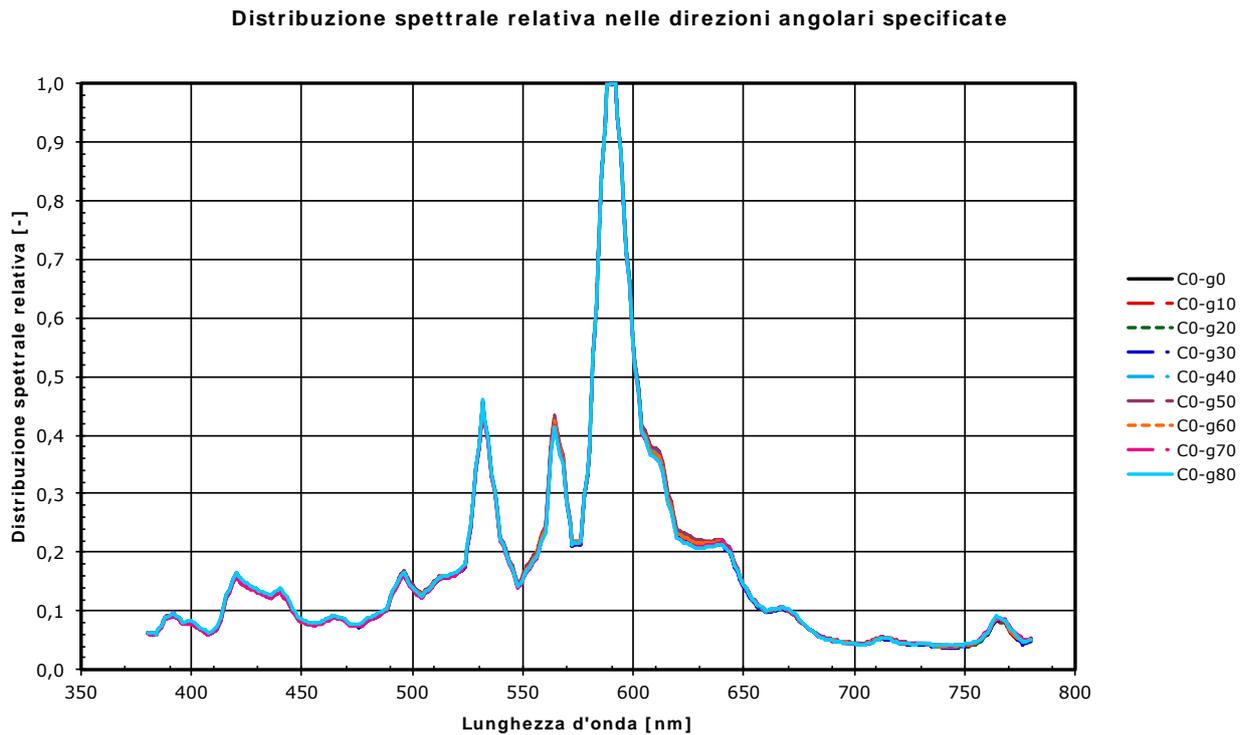


Figura 26 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C0).

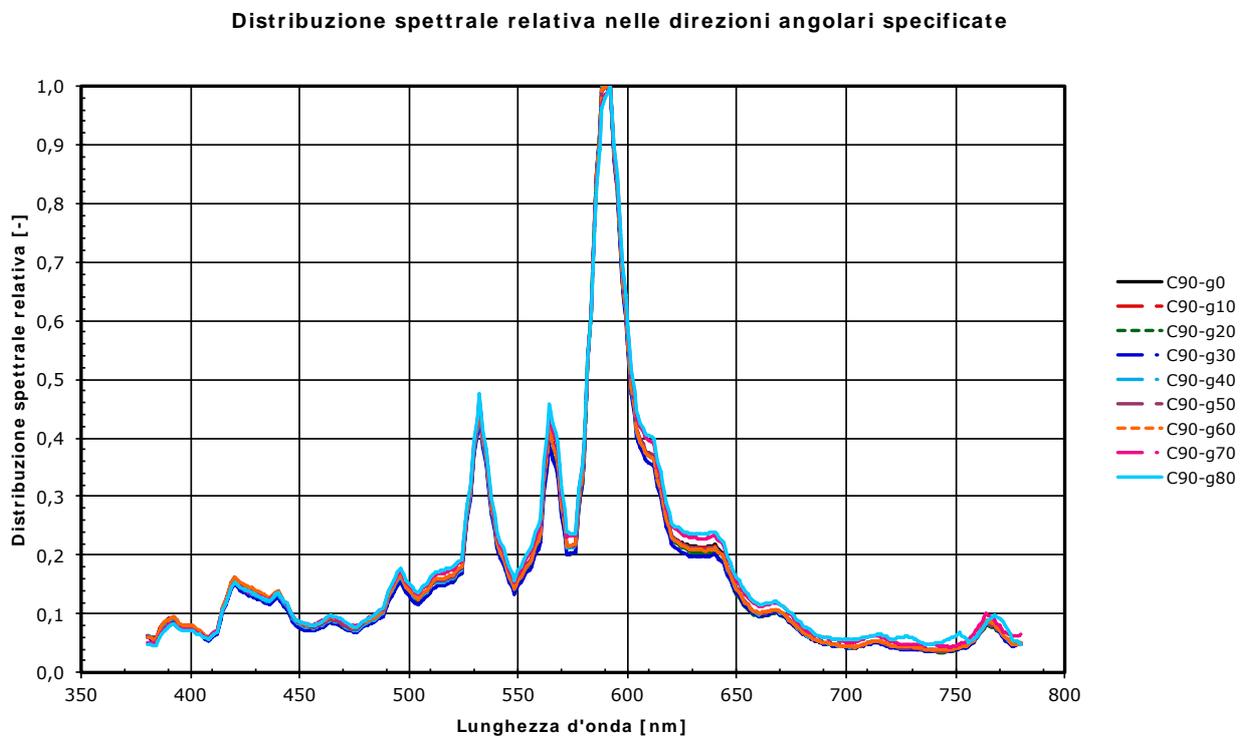


Figura 27 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C90).

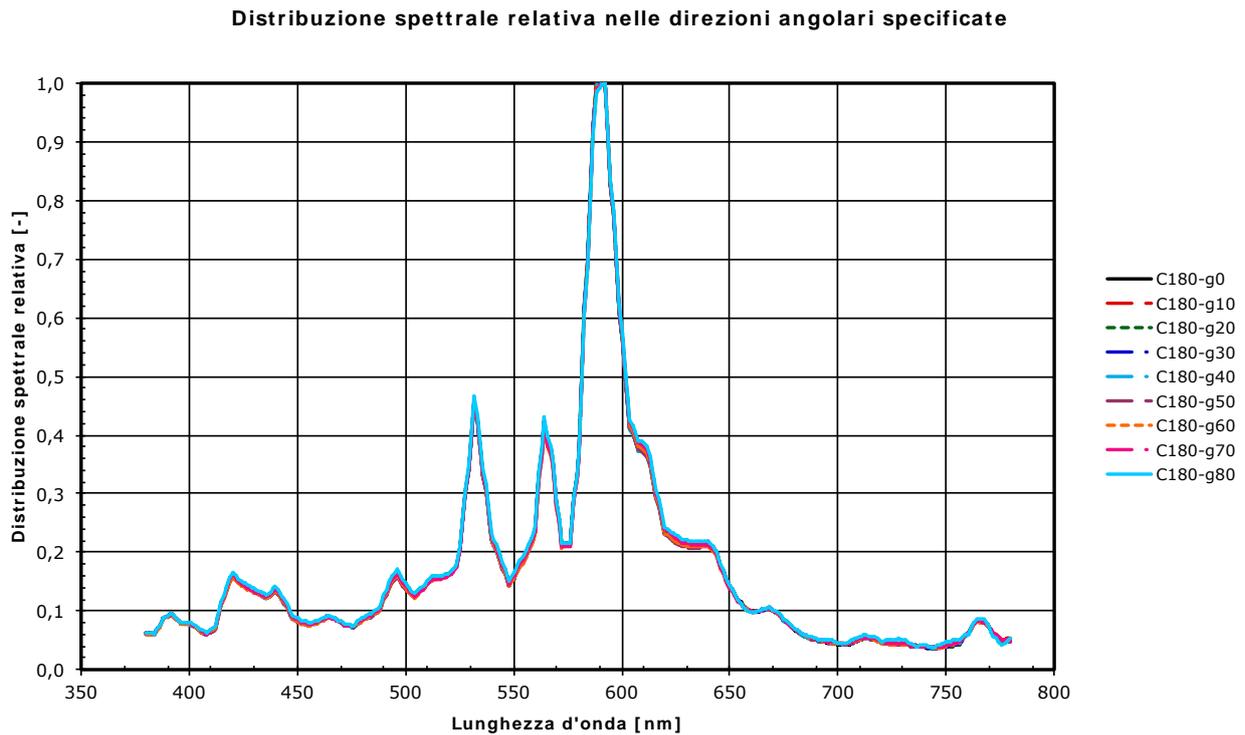


Figura 28 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C180).

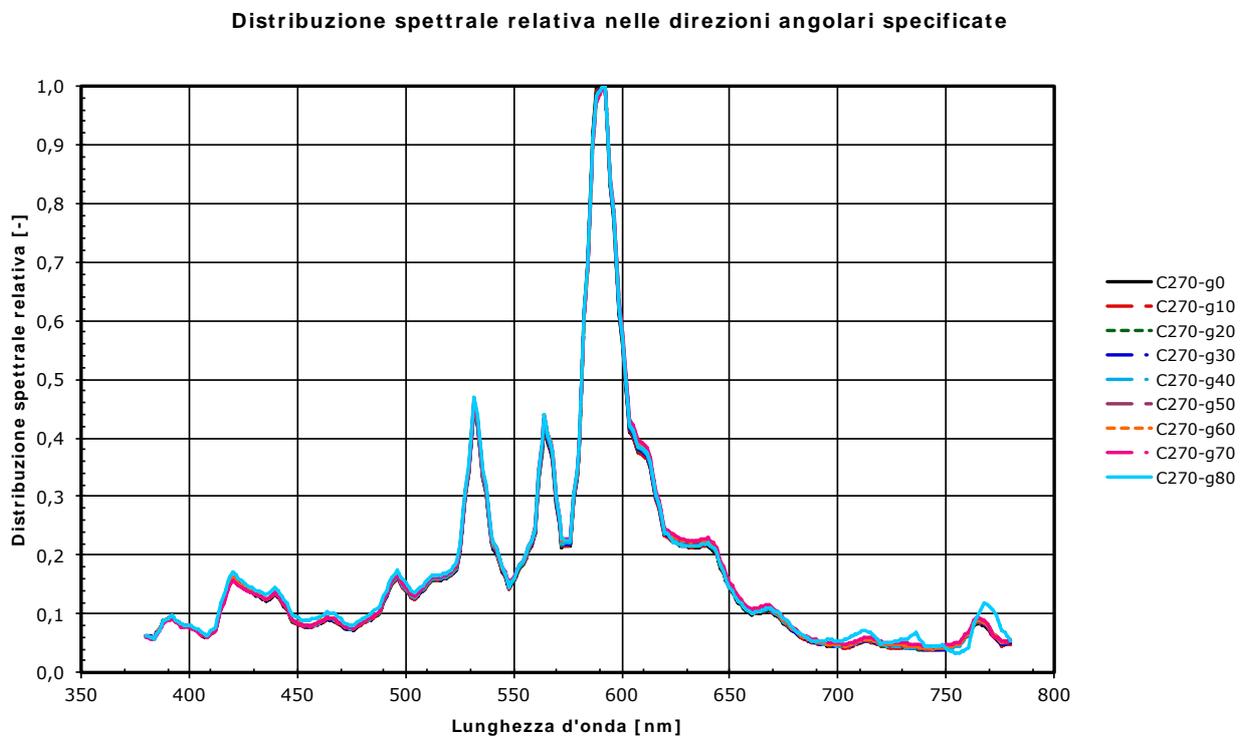


Figura 29 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C270).

7.4. Apparecchio Schreder con sorgente a LED e vetro piano

7.4.1. Flusso luminoso e parametri elettrici in funzione della tensione di alimentazione

Nella

Figura 30 è riportata la variazione del flusso luminoso emesso in funzione della tensione di alimentazione. Le variazioni sono inferiori all'incertezza di misura del flusso luminoso dichiarata al valore nominale di alimentazione.

La

Figura 31 descrive la variazione della potenza elettrica assorbita nelle stesse condizioni operative, la

Figura 32 considera il fattore di potenza e la Figura 33 la corrente assorbita.

La Figura 34 descrive la variazione dell'efficienza luminosa in funzione della tensione di alimentazione.

Le variazioni con la tensione di alimentazione delle prestazioni fotometriche ed elettriche dell'apparecchio di illuminazione sono contenute risultando trascurabili nella pratica illuminotecnica.

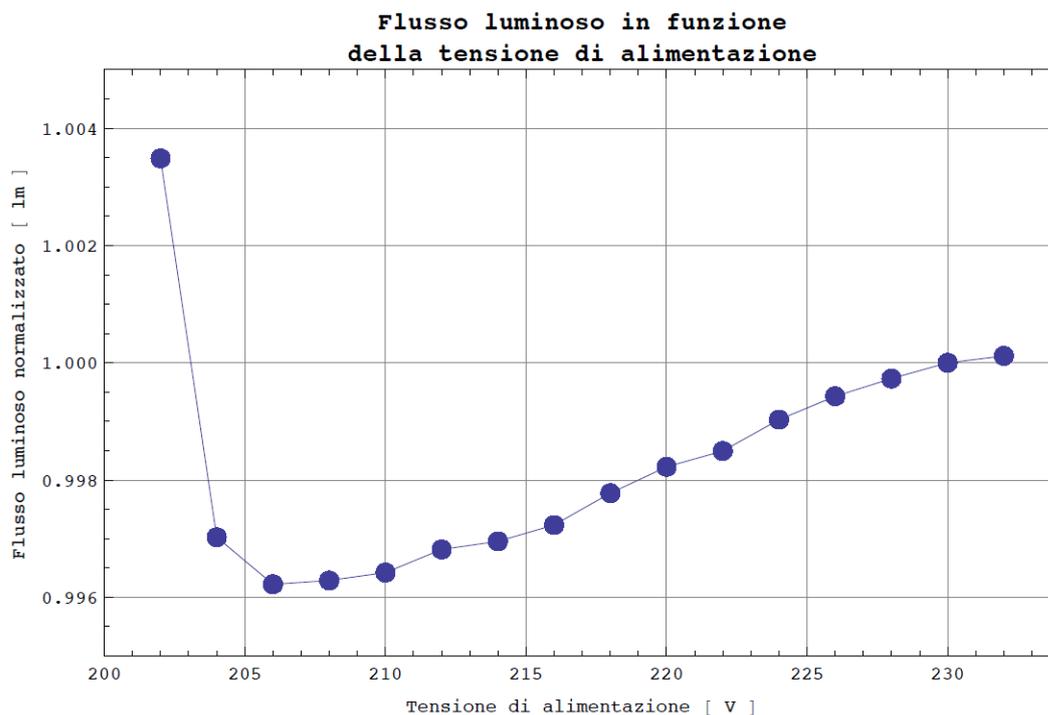


Figura 30 Variazione del flusso luminoso (normalizzato) emesso dall'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

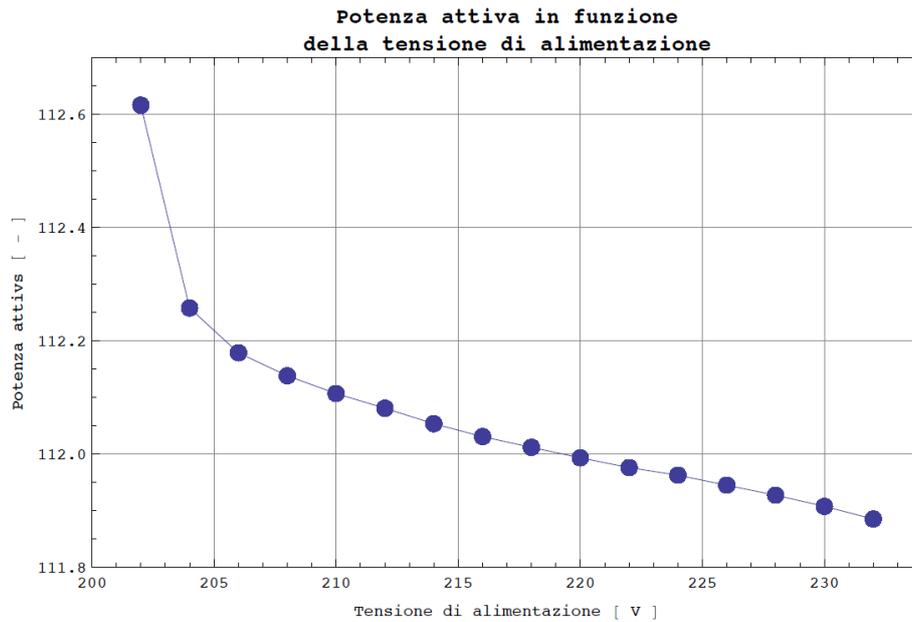


Figura 31 Variazione della potenza attiva assorbita dall'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

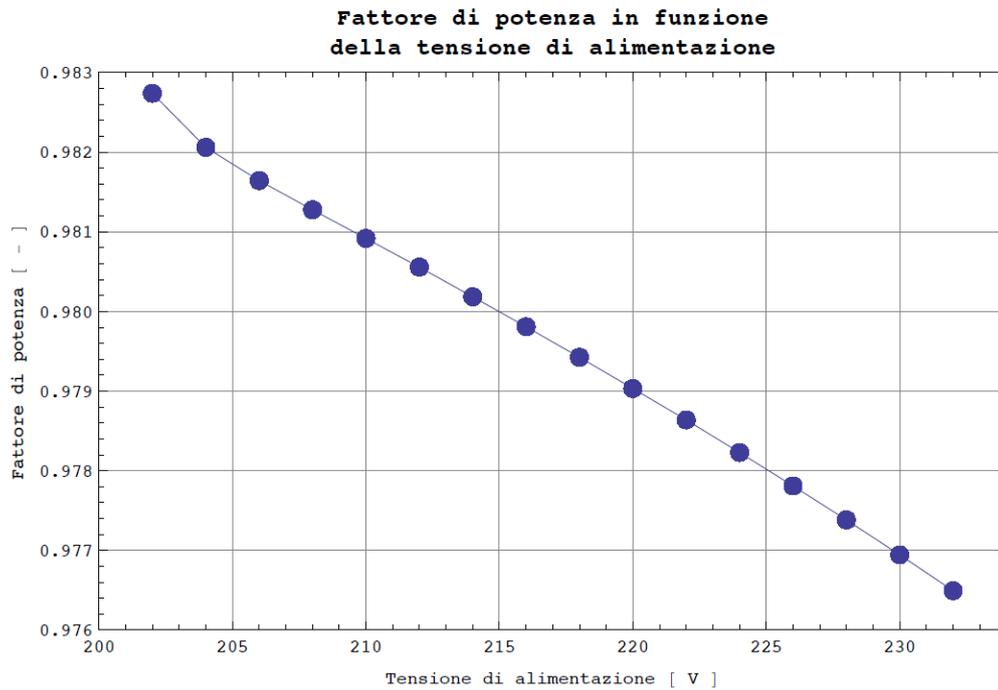


Figura 32 Variazione del fattore di potenza elettrica dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

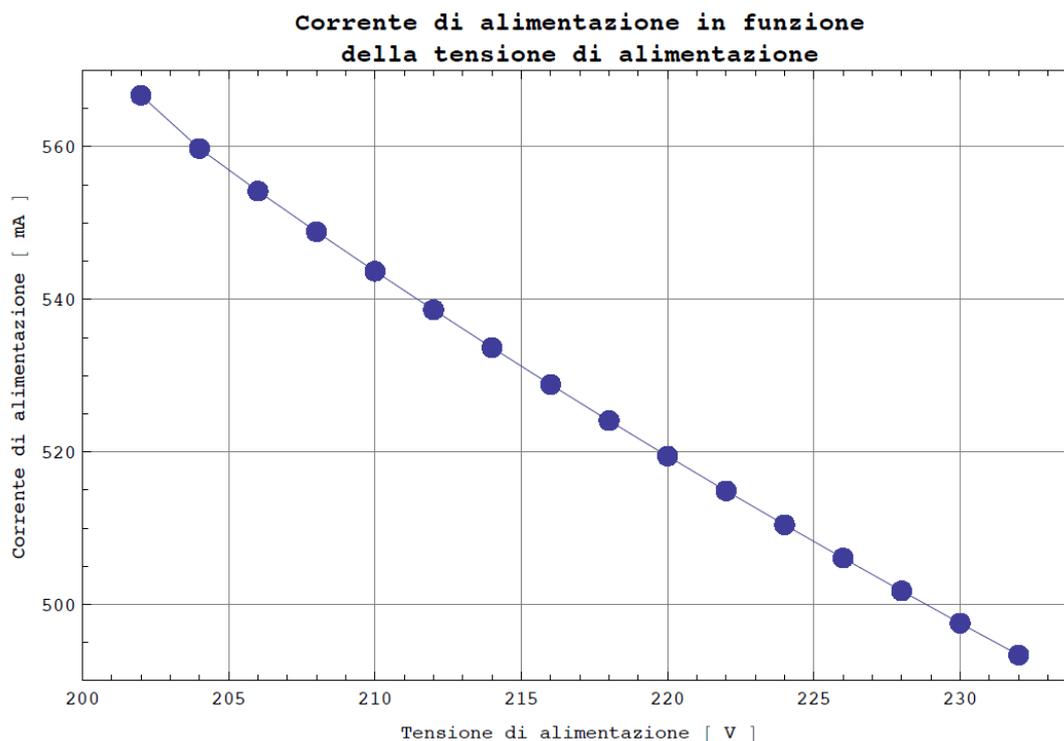


Figura 33 Variazione della corrente di alimentazione dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

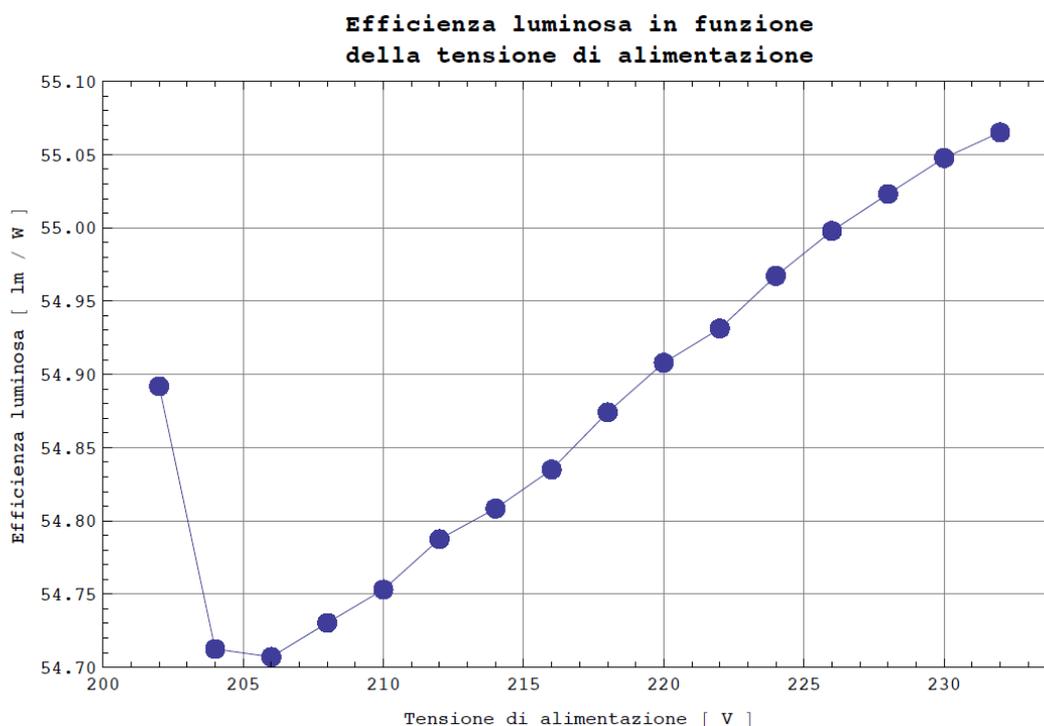


Figura 34 Variazione dell'efficienza luminosa dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

7.4.2. Condizioni colorimetriche

Nella Tabella 4 sono riassunti i parametri colorimetrici calcolati dalla distribuzione spettrale della radiazione emessa dalla sorgente agli angoli del sistema di coordinate $C\gamma$ specificati.

I grafici da Figura 35 a Figura 38 riportano l'andamento della distribuzione spettrale normalizzata in funzione degli angoli di misura.

Tabella 4 Tabella riassuntiva delle prestazioni colorimetriche misurate per l'apparecchio.

Piano C	Angolo γ	Coordinate tricromatiche		Temperatura di colore prossima	Indice di resa dei colori			
					Ra			
		x	y	TCC	Temperatura di colore prossima della sorgente di riferimento			
					4000 K	4500 K	5000 K	Temperatura di colore prossima della sorgente nella direzione misurata
[°]	[-]	[-]	[K]	[-]				
0,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	80 ± 1
0,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,357 ± 0,008	0,372 ± 0,008	4 700 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,375 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,362 ± 0,008	0,377 ± 0,008	4 500 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,362 ± 0,008	0,377 ± 0,008	4 500 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,375 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,357 ± 0,008	0,372 ± 0,008	4 700 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	78 ± 1
90,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,355 ± 0,008	0,370 ± 0,008	4 700 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	78 ± 1
90,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,353 ± 0,008	0,371 ± 0,008	4 800 ± 100	73 ± 1	77 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,358 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 600 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,358 ± 0,008	0,372 ± 0,008	4 600 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,358 ± 0,008	0,372 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	80 ± 1
180,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,362 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 500 ± 100	76 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	80 ± 1
180,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,362 ± 0,008	0,375 ± 0,008	4 500 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	80 ± 1
180,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,370 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,358 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 700 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,357 ± 0,008	0,372 ± 0,008	4 700 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,357 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 700 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,358 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 700 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,358 ± 0,008	0,375 ± 0,008	4 600 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1

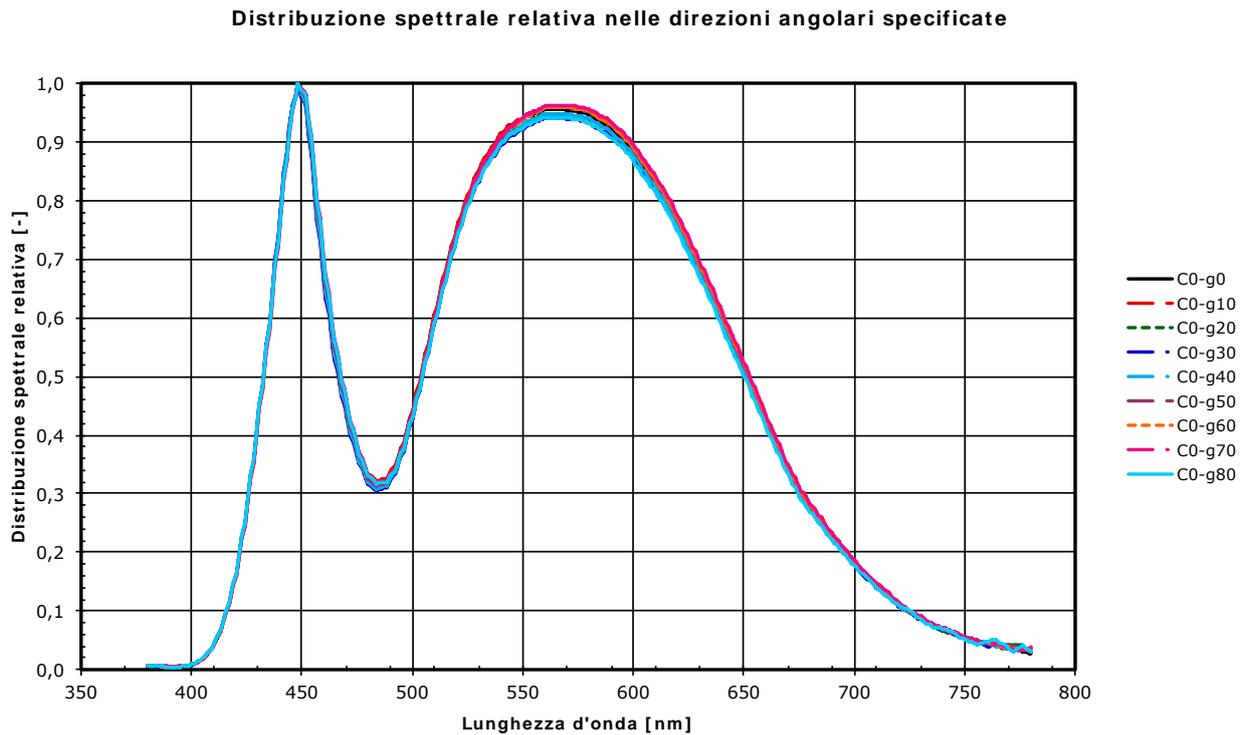


Figura 35 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C0).

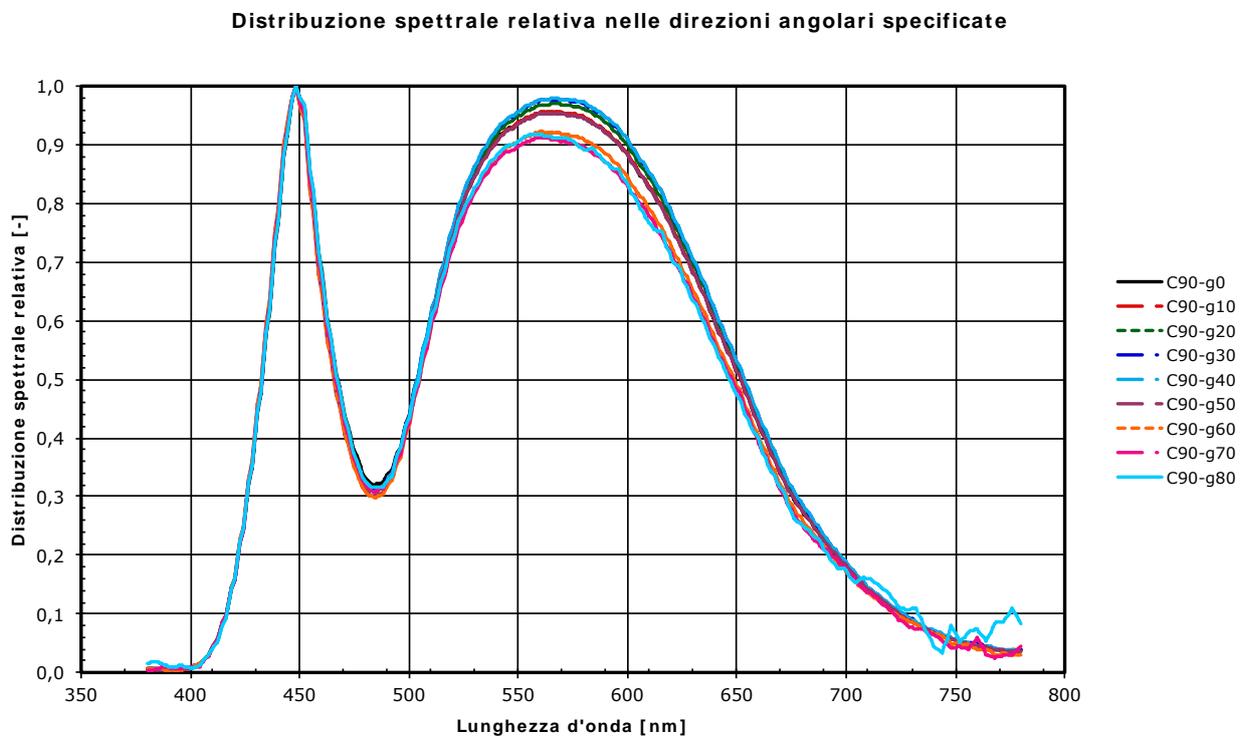


Figura 36 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C90).

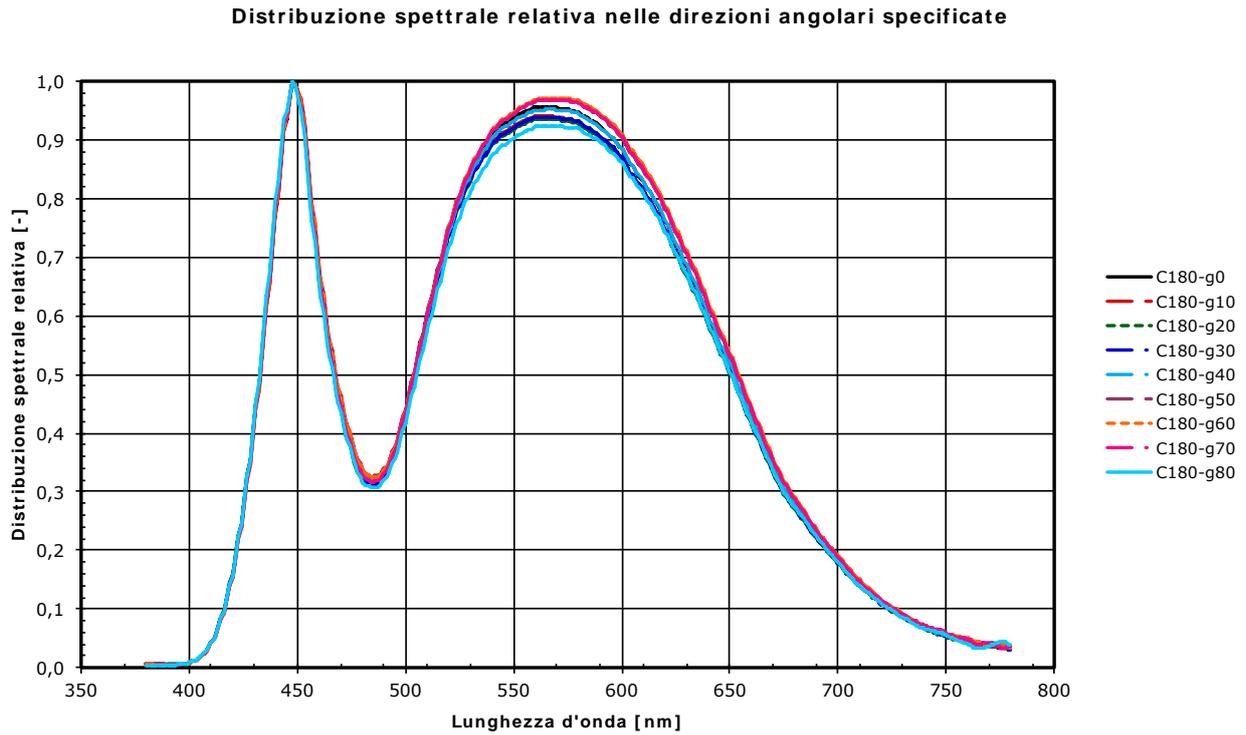


Figura 37 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C180).

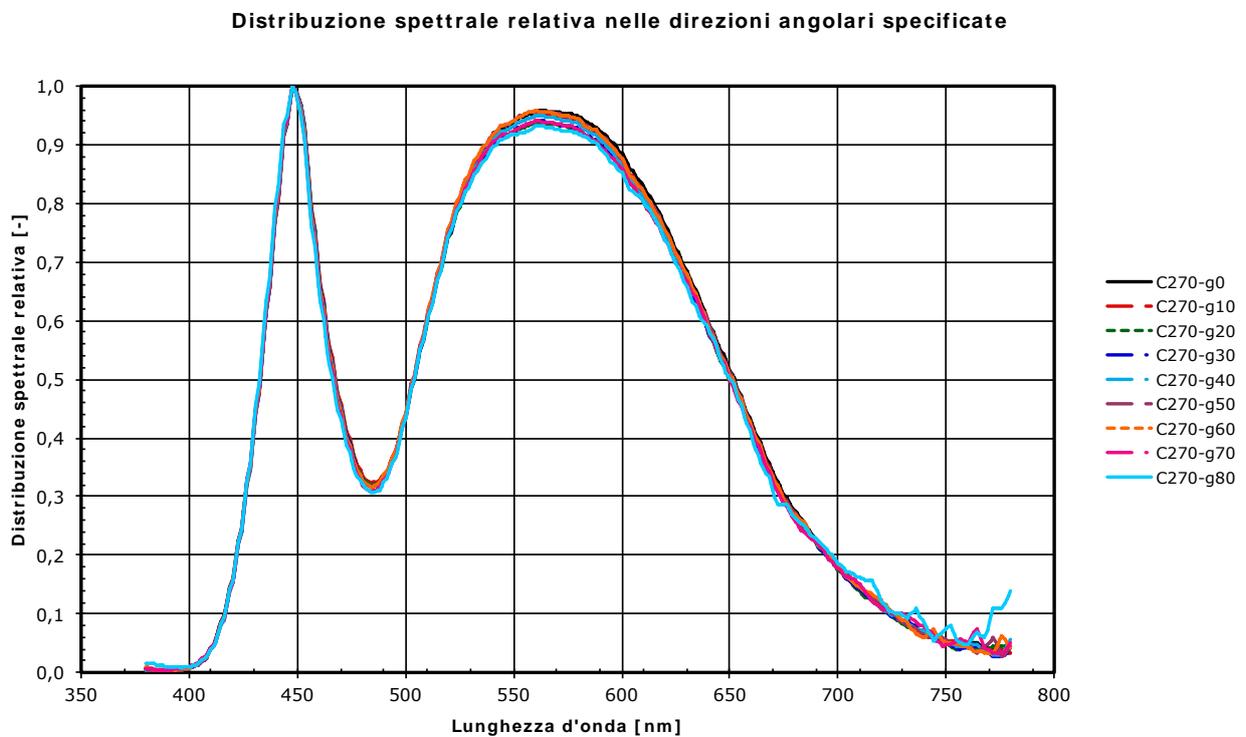


Figura 38 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C270).

7.5. Apparecchio Schreder con sorgente a LED e vetro curvo

7.5.1. Flusso luminoso e parametri elettrici in funzione della tensione di alimentazione

Nella Figura 39 è riportata la variazione del flusso luminoso emesso in funzione della tensione di alimentazione. Le variazioni sono inferiori all'incertezza di misura del flusso luminoso dichiarata al valore nominale di alimentazione.

La Figura 40 descrive la variazione della potenza elettrica assorbita nelle stesse condizioni operative, la

Figura 41 considera il fattore di potenza e la

Figura 42 la corrente assorbita.

La

Figura 43 descrive la variazione dell'efficienza luminosa in funzione della tensione di alimentazione.

Le variazioni con la tensione di alimentazione delle prestazioni fotometriche ed elettriche dell'apparecchio di illuminazione sono contenute risultando trascurabili nella pratica illuminotecnica.

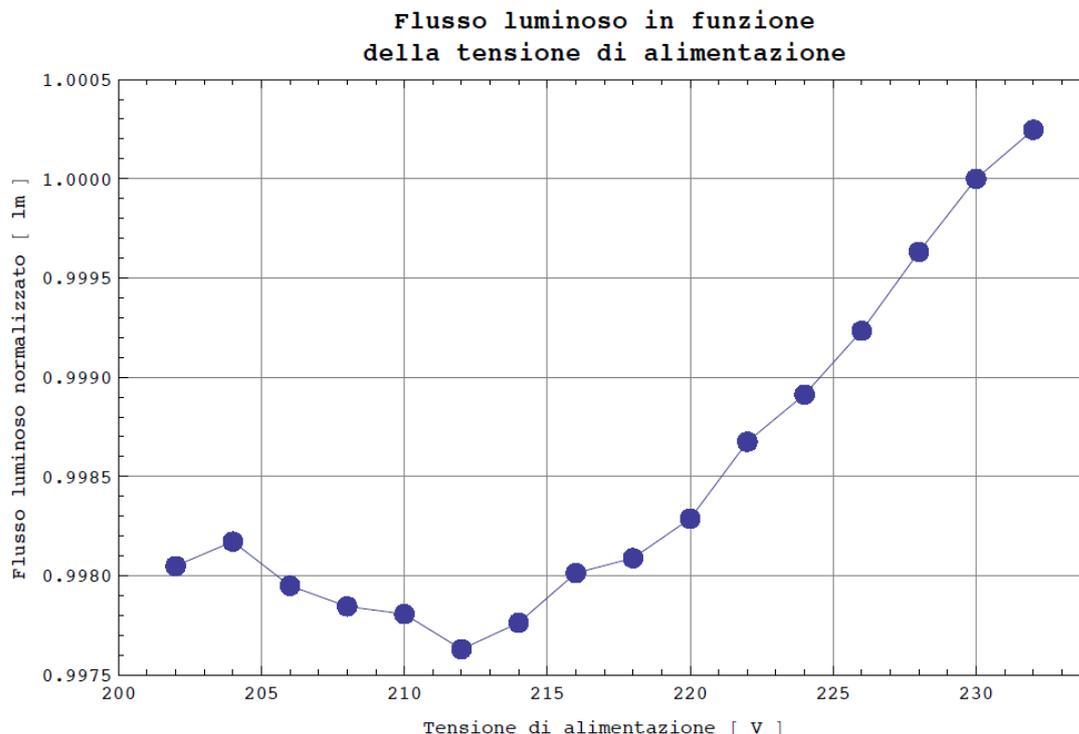


Figura 39 Variazione del flusso luminoso (normalizzato) emesso dall'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

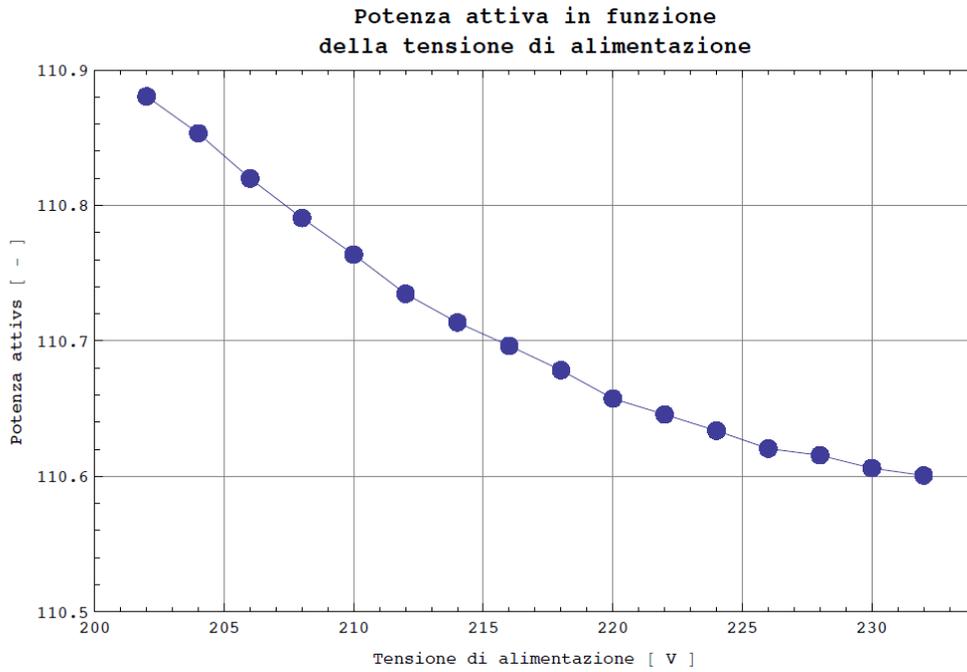


Figura 40 Variazione della potenza attiva assorbita dall'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

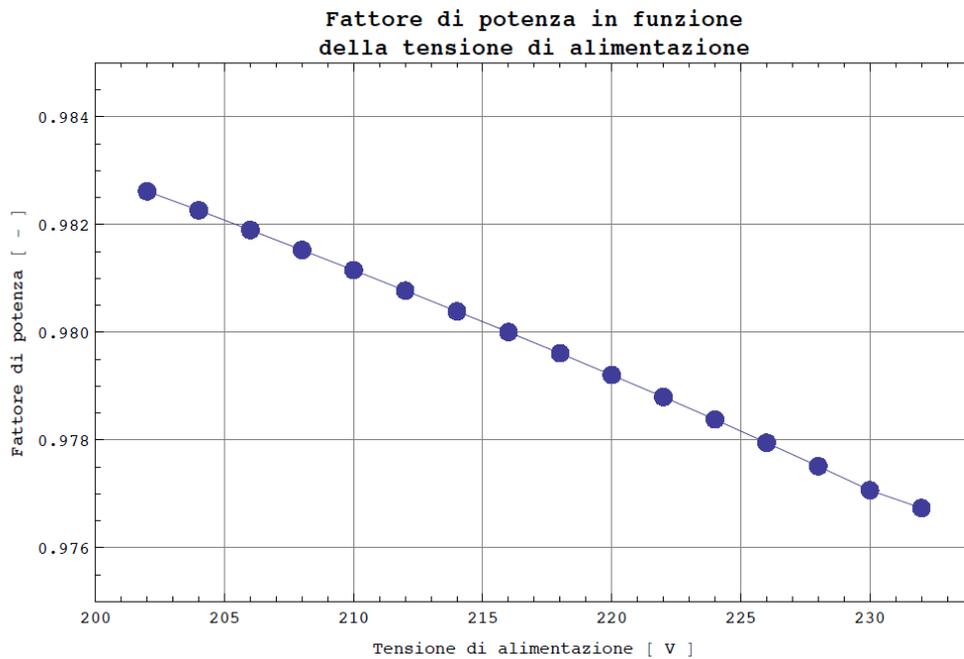


Figura 41 Variazione del fattore di potenza elettrico dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

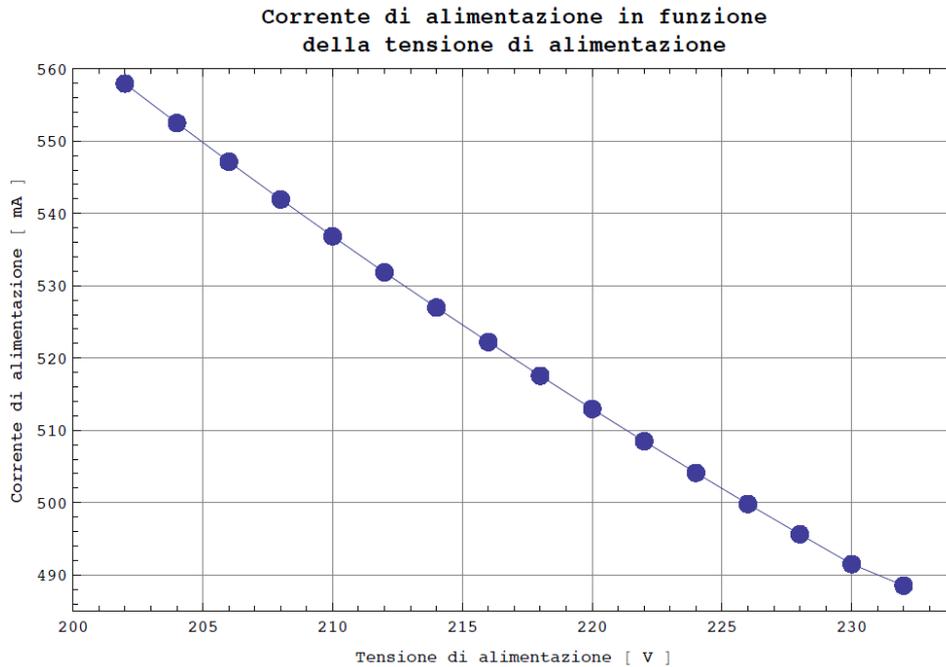


Figura 42 Variazione della corrente di alimentazione dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

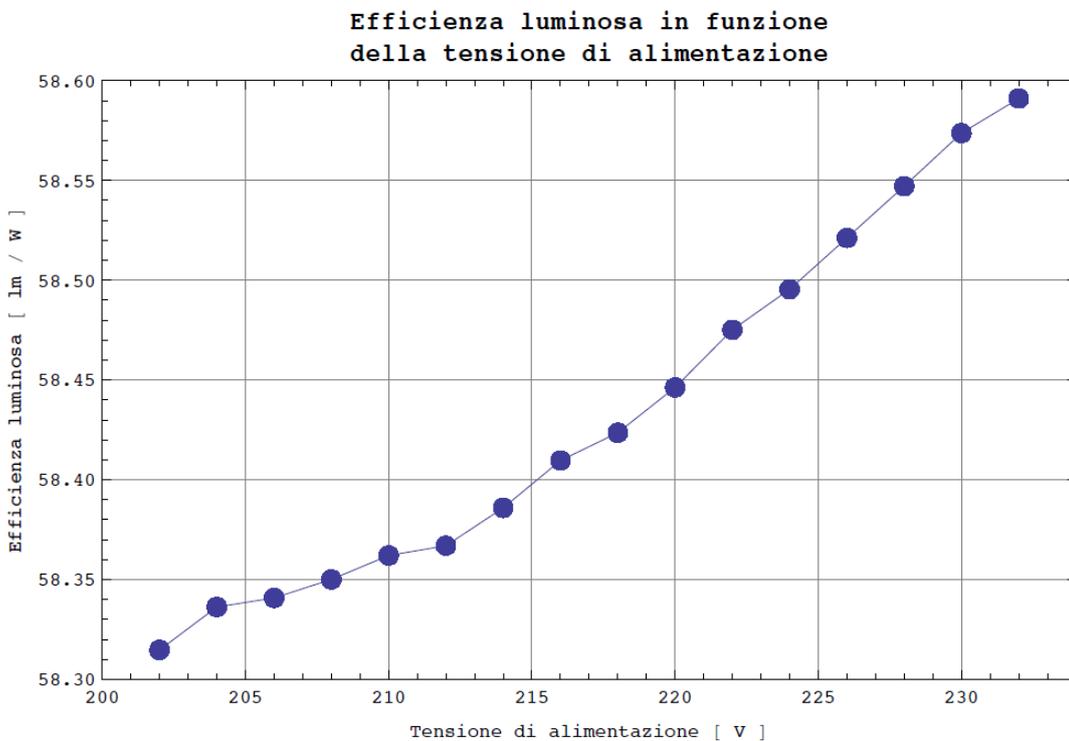


Figura 43 Variazione dell'efficienza luminosa dell'apparecchio di illuminazione in funzione della tensione di alimentazione.

7.5.2. Condizioni colorimetriche

Nella Tabella 5 sono riassunti i parametri colorimetrici calcolati dalla distribuzione spettrale della radiazione emessa dalla sorgente agli angoli del sistema di coordinate $C\gamma$ specificati.

I grafici da Figura 44 a Figura 45 riportano l'andamento della distribuzione spettrale normalizzata in funzione degli angoli di misura.

Tabella 5 Tabella riassuntiva delle prestazioni colorimetriche misurate per l'apparecchio.

Piano C	Angolo ϑ	Coordinate tricromatiche		Temperatura di colore prossima	Indice di resa dei colori			
					Ra			
		x	y	TCC	Temperatura di colore prossima della sorgente di riferimento			
					4000 K	4500 K	5000 K	Temperatura di colore prossima della sorgente nella direzione misurata
[°]	[-]	[-]	[K]	[-]				
0,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,375 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,372 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
0,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,358 ± 0,008	0,372 ± 0,008	4 700 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,375 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,362 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 500 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,357 ± 0,008	0,372 ± 0,008	4 700 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,357 ± 0,008	0,373 ± 0,008	4 700 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
90,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,358 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,375 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	60,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
180,0 ± 0,1	70,0 ± 0,1	0,362 ± 0,008	0,375 ± 0,008	4 500 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	80 ± 1
180,0 ± 0,1	80,0 ± 0,1	0,353 ± 0,008	0,364 ± 0,008	4 800 ± 100	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	0,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	79 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	10,0 ± 0,1	0,361 ± 0,008	0,376 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	20,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	30,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,374 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	81 ± 1	79 ± 1
270,0 ± 0,1	40,0 ± 0,1	0,359 ± 0,008	0,375 ± 0,008	4 600 ± 100	81 ± 1	74 ± 1	68 ± 1	73 ± 1
270,0 ± 0,1	50,0 ± 0,1	0,360 ± 0,008	0,377 ± 0,008	4 600 ± 100	75 ± 1	78 ± 1	81 ± 1	79 ± 1

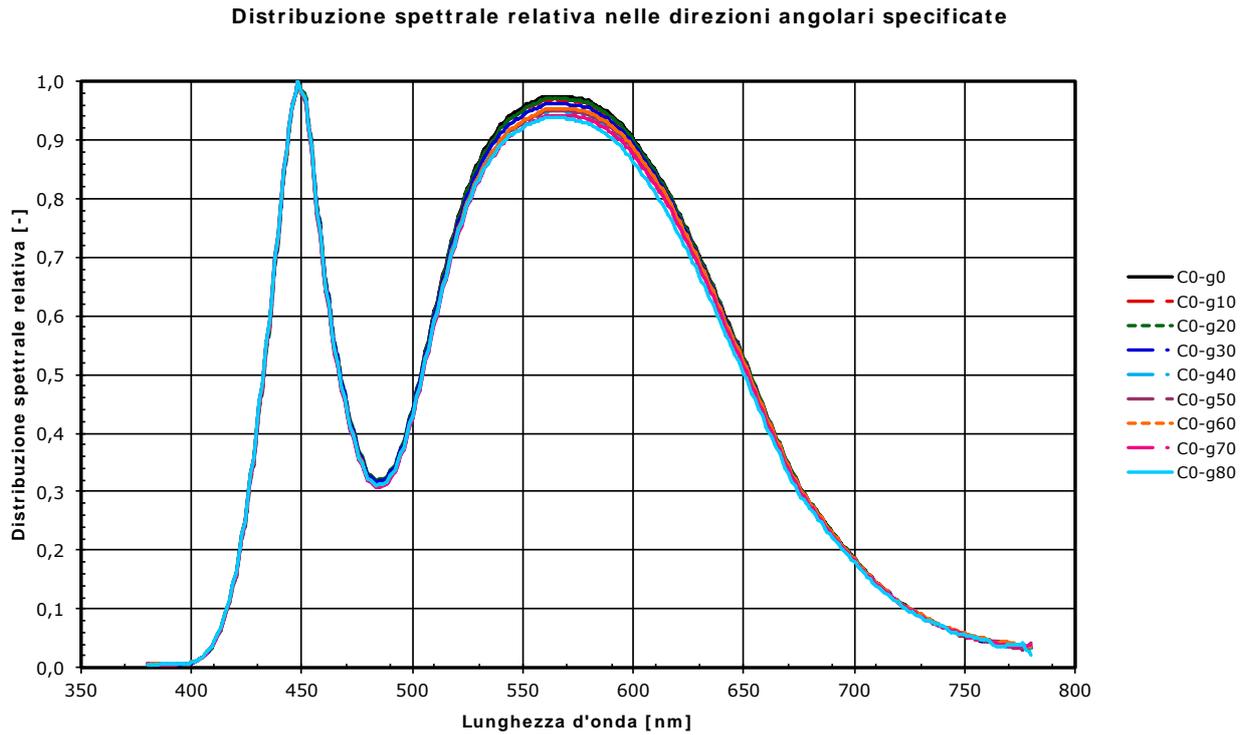


Figura 44 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C0).

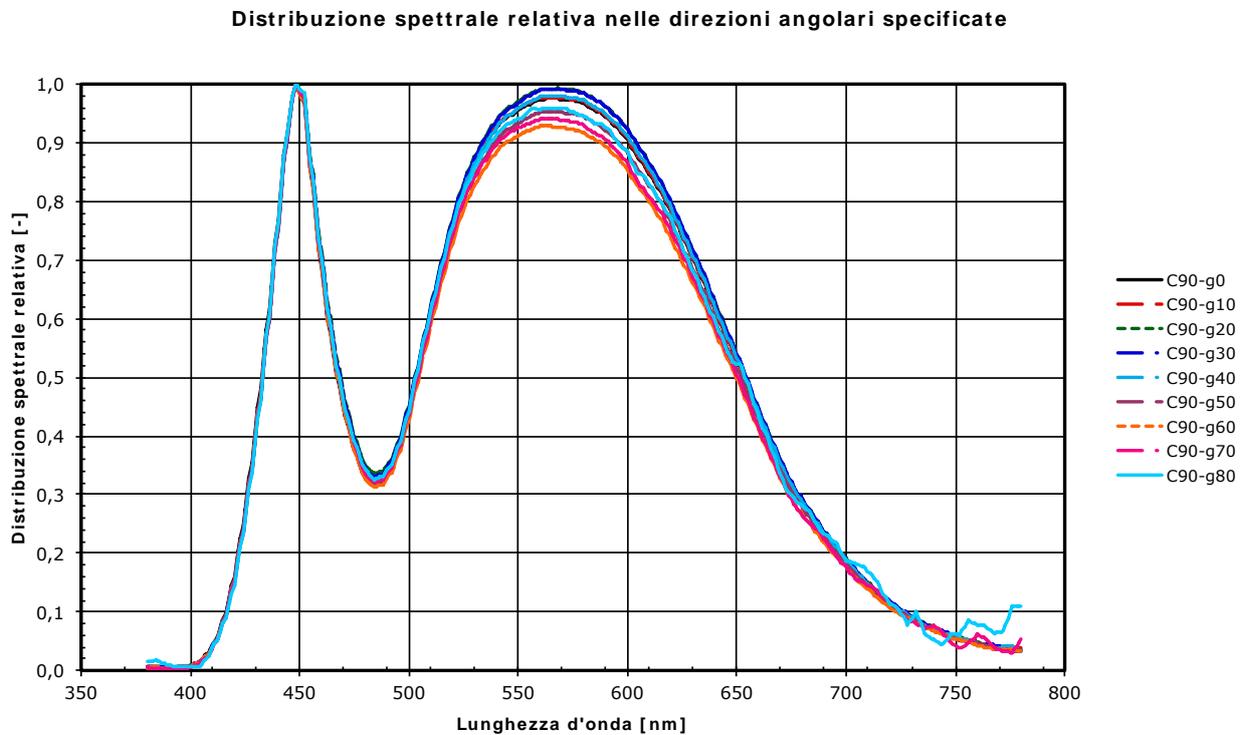


Figura 45 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C90).

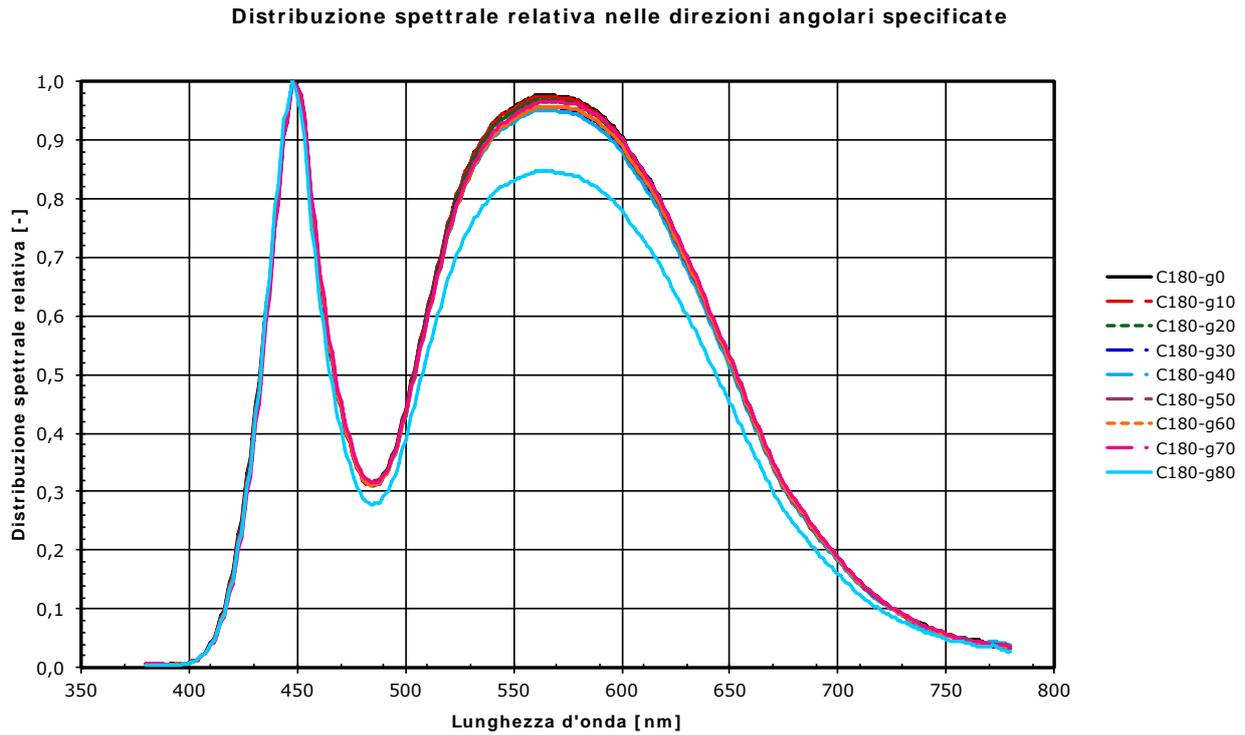


Figura 46 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C180).

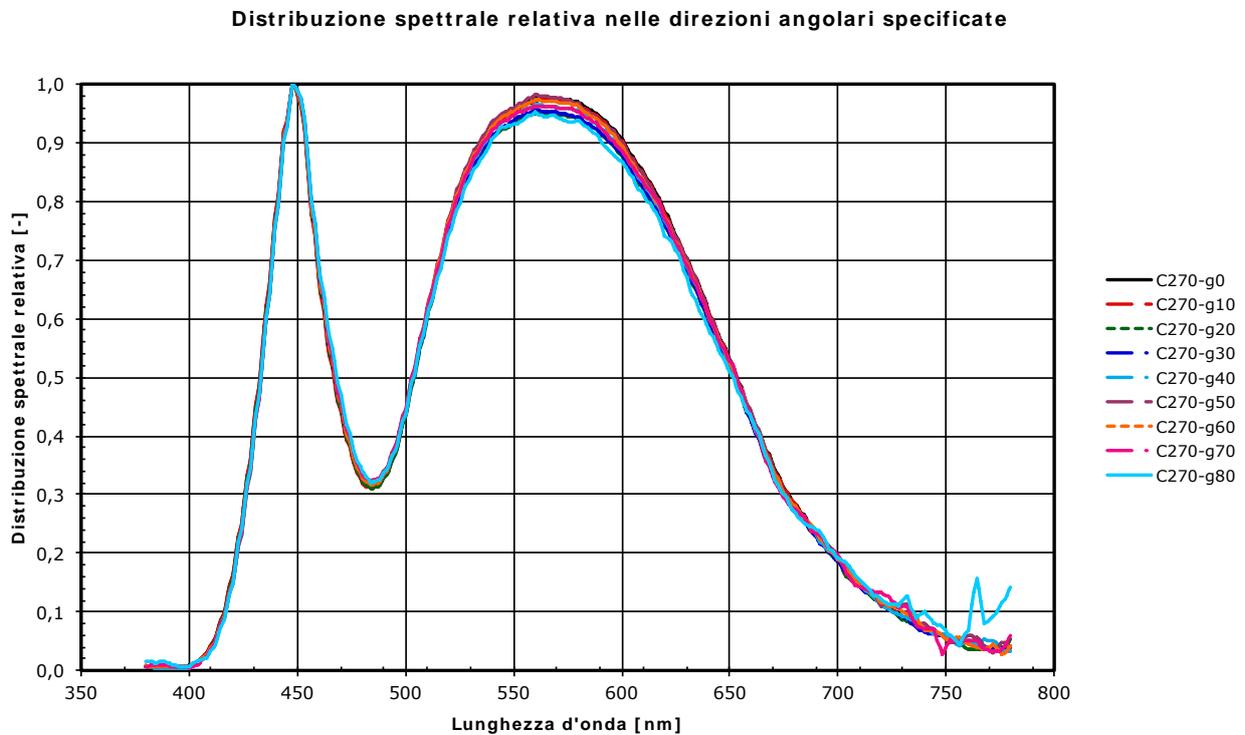


Figura 47 Variazione della distribuzione spettrale relativa della radiazione emessa nella direzione specificata dall'angolo γ (piano C270).

7.6. Flusso luminoso e parametri elettrici

La Tabella 6 fornisce i dati, comprensivi di incertezza di misura, dei parametri fotometrici misurati e la Tabella 7 fornisce i dati di quelli elettrici misurati

Per il flusso luminoso oltre alla tradizionale suddivisione in flusso luminoso emesso nel semispazio inferiore e superiore si è calcolato il flusso luminoso emesso nella zona sferica delimitata dai paralleli con angoli $\gamma = 90^\circ$ e $\gamma = 100^\circ$ per considerare la quota di radiazione emessa direttamente negli angoli di maggior interesse ai fini dell'inquinamento luminoso.

Il flusso luminoso emesso negli angoli compresi tra $\gamma = 88^\circ$ e $\gamma = 90^\circ$ e tra $\gamma = 90^\circ$ e $\gamma = 92^\circ$ permette di valutare l'influenza delle tolleranze di allineamento sul campo. Si ritiene infatti realistico che l'apparecchio installato possa avere, rispetto alla condizione nominale di progetto, una variazione massima angolare di 2° .

Nella Tabella 8 sono invece comparate le prestazioni, a parità di sorgente, tra gli apparecchi a vetro piano e quelli a vetro curvo. Per le modalità seguite nella fase di caratterizzazione l'incertezza di misura dei rapporti tabulati risulta notevolmente inferiore a quella dei parametri di partenza in quanto molte grandezze che intervengono nel calcolo dell'incertezza sono correlate. In questo caso, per comodità di lettura, l'incertezza non è esplicitata direttamente, ma fornita indirettamente attraverso il numero di cifre significative tabulate.

Gli apparecchi a vetro curvo presentano una efficienza maggiore del 4-6% rispetto al corrispondente con vetro piano.

Il flusso luminoso emesso nella zona sferica delimitata dagli angoli $\gamma = 90^\circ$ e $\gamma = 100^\circ$ risulta compreso tra il 0,2 e lo 0,015% del flusso totale emesso.

Tabella 6 Tabella riassuntiva delle prestazioni fotometriche degli apparecchi di illuminazione misurati.

Parametro	Condizione	Simbolo	Unità di misura	Misura	Apparecchio di illuminazione			
					Sorgente luminosa			
					Ioduri Metallici		LED	
					Tipologia vetro			
					Pi ano	Cur vo	Pi ano	Cur vo
					Modello			
					SGS253	SGS253	SENSO2	SENSO2
					Codice INRI M			
					8258	8259	8260	8261
Flusso luminoso	Alimentazione nominale: Su tutto lo spazio	$F_{0-180,n}$	[lm]	Media	8 100 ± 120	8 400 ± 130	6 170 ± 93	6 490 ± 97
	Massimo: Su tutto lo spazio	$F_{0-180,max}$	[lm]	Media	8 200 ± 100	8 500 ± 100	6 190 ± 90	6 490 ± 100
	Minimo: Su tutto lo spazio	$F_{0-180,min}$	[lm]	Media	8 000 ± 100	8 400 ± 100	6 150 ± 90	6 480 ± 100
	Alimentazione nominale: semispazio inferiore	$F_{0-90,n}$	[lm]	Media	8 100 ± 120	8 400 ± 130	6 160 ± 92	6 480 ± 97
	Alimentazione nominale: semispazio superiore	$F_{90-180,n}$	[lm]	Media	1,16 ± 0,02	5,78 ± 0,09	8,7 ± 0,1	13,7 ± 0,2
	Alimentazione nominale: 88 ° ≤ g ≤ 90 °	$F_{88-90,n}$	[lm]	Media	1,34 ± 0,03	1,20 ± 0,03	0,63 ± 0,02	4,6 ± 0,1
	Alimentazione nominale: 90 ° < g ≤ 92 °	$F_{90-92,n}$	[lm]	Media	0,41 ± 0,01	0,82 ± 0,02	0,42 ± 0,01	3,29 ± 0,08
Alimentazione nominale: 90 ° ≤ g ≤ 100 °	$F_{90-180,n}$	[lm]	Media	0,75 ± 0,01	2,57 ± 0,05	1,07 ± 0,02	8,3 ± 0,2	

Tabella 7 Tabella riassuntiva delle prestazioni elettriche degli apparecchi di illuminazione misurati.

Parametro	Condizione	Simbolo	Unità di misura	Misura	Apparecchio di illuminazione			
					Sorgente luminosa			
					Ioduri Metallici		LED	
					Tipologia vetro			
					Pi ano	Cur vo	Pi ano	Cur vo
					Modello			
					SGS253	SGS253	SENSO2	SENSO2
					Codice INRI M			
					8258	8259	8260	8261
Potenza attiva	Alimentazione nominale	P_n	[W]	Media	96,80 ± 0,08	96,61 ± 0,08	111,91 ± 0,09	110,61 ± 0,09
	Massimo	P_{max}	[W]	Massimo	97,03 ± 0,08	97,25 ± 0,08	112,62 ± 0,09	110,88 ± 0,09
	Minimo	P_{min}	[W]	Minimo	96,79 ± 0,08	96,43 ± 0,08	111,89 ± 0,09	110,60 ± 0,09
Fattore di potenza	Alimentazione nominale	l_n	[l]	Media	0,987 ± 0,005	0,988 ± 0,005	0,977 ± 0,005	0,977 ± 0,005
	Massimo	l_{max}	[l]	Massimo	0,990 ± 0,005	0,993 ± 0,005	0,983 ± 0,005	0,983 ± 0,005
	Minimo	l_{min}	[l]	Minimo	0,986 ± 0,005	0,988 ± 0,005	0,976 ± 0,005	0,977 ± 0,005
Corrente di alimentazione	Alimentazione nominale	I_n	[mA]	Media	426,2 ± 0,3	424,9 ± 0,3	497,5 ± 0,4	491,5 ± 0,4
	Massima	I_{max}	[mA]	Massimo	484,7 ± 0,4	484,5 ± 0,4	566,7 ± 0,5	558,0 ± 0,4
	Minima	I_{min}	[mA]	Minimo	422,7 ± 0,3	421,0 ± 0,3	493,4 ± 0,4	488,5 ± 0,4
Efficienza luminosa	Alimentazione nominale	h_n	[lm / W]	Media	83,6 ± 1	87,1 ± 1	55,0 ± 0,9	58,6 ± 0,9
	Massima	h_{max}	[lm / W]	Massimo	84,1 ± 1	87,3 ± 1	55,1 ± 0,9	58,6 ± 0,9
	Minima	h_{min}	[lm / W]	Minimo	82,9 ± 1	87,1 ± 1	54,7 ± 0,9	58,3 ± 0,9

Tabella 8 Tabella comparativa delle prestazioni fotometriche e dell'efficienza luminosa degli apparecchi di illuminazione misurati.

Parametro	Condizione	Simbolo	Unità di misura	Misura	Apparecchi di illuminazione			
					Sorgente luminosa			
					Ioduri Metallici		LED	
					Tipologia vetro			
					Pi ano	Cur vo	Pi ano	Cur vo
					Modello			
					SGS253	SGS253	SENSO2	SENSO2
					Codice INRIM			
8258	8259	8260	8261					
Rapporto flussi luminosi	Alimentazione nominale: Su tutto lo spazio	$f_{0-180,n}$	[1]	Media	1,000	1,040	1,000	1,052
	Alimentazione nominale: semispazio inferiore	$f_{0-90,n}$	[1]	Media	1,000	1,040	1,000	1,052
	Alimentazione nominale: semispazio superiore	$f_{90-180,n}$	[1]	Media	1,000	5,00	1,000	1,578
	Alimentazione nominale: $88^\circ \leq g \leq 90^\circ$	$f_{88-90,n}$	[1]	Media	1,000	0,894	1,000	7,34
	Alimentazione nominale: $90^\circ < g \leq 92^\circ$	$f_{90-92,n}$	[1]	Media	1,000	1,998	1,000	7,84
	Alimentazione nominale: $90^\circ \leq g \leq 100^\circ$	$f_{90-100,n}$	[1]	Media	1,000	3,44	1,000	7,80
Rapporto efficienze luminose	Alimentazione nominale	$h_{r,n}$	[1]	Media	1,000	1,042	1,000	1,064

8. CARATTERIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI

8.1. Caratterizzazione secondo normativa

Gli impianti installati nei due siti di misura (Marcallo con Casone - §3.2 e INRIM - §3.4) sono stati caratterizzati, a terra, seguendo le indicazioni riportate nella normativa UNI EN 13201-4:2004.

Sebbene le strade oggetto della misura fossero a doppio senso di circolazione sono state trattate come strade a due corsie a senso unico.

La possibilità di disporre di due siti di installazione ha consentito di testare gli apparecchi in due diverse condizioni considerando sia tre pali alle interdistanze previste in fase progettuale sia il singolo apparecchio isolato.

Definite le opportune griglie di misura (uguali per le due installazioni) e misurati i valori puntuali di illuminamento orizzontale ad altezza del manto stradale e la luminanza dello manto con osservatore posto come richiesto dalla norma UNI EN 13201-3:2004 sono stati calcolati i parametri di qualità:

- valore medio di illuminamento;
- valore minimo di illuminamento;
- l'uniformità generale di illuminamento come rapporto tra il valore minimo e valore medio di tutti i dati di misura della griglia di misura;
- l'uniformità longitudinale di illuminamento come rapporto tra il valore minimo e valore massimo misurati sulla stessa linea centrale di ogni corsia della griglia di misura;
- il valore medio di luminanza;
- l'uniformità generale;

- l'uniformità longitudinale;
- il coefficiente di luminanza dell'impianto ossia il rapporto tra la luminanza media e l'illuminamento medio.

Tutti i valori di luminanza sono stati misurati con osservatore nella corsia di marcia e di sorpasso.

8.1.1. Impianti installati nel sito di Marcallo con Casone

Nelle figure da Figura 48 a Figura 51 sono visualizzate le condizioni di illuminazione degli impianti di Marcallo con Casone.

Gli impianti erano composti da tre apparecchi. La griglia normativa è stata definita, tenendo conto delle interdistanze di progetto [17] tra i primi due apparecchi consecutivi.

Per la misura questa griglia, definita tra il primo e il secondo apparecchio, è stata duplicata tra il secondo e terzo apparecchio e sono stati misurati i punti a cavallo dell'apparecchio centrale (griglia di misura).

In questo modo, applicando la sovrapposizione degli effetti, per le misure di illuminamento è stato possibile calcolare i parametri di illuminamento per tutti i punti della griglia normativa.

Le misure di luminanza sono state invece eseguite esclusivamente sui punti della griglia di misura con osservatore posto a 60 m.

La Tabella 9 riporta i risultati delle misure relative all'illuminamento mentre nella Tabella 10 sono riportati i risultati relativi alle misure di luminanza.

Le curve isolux dei 4 impianti, riferite alla griglia normativa, sono diagrammate nei grafici da Figura 52 a Figura 55.



Figura 48 Impianto con apparecchio con vetro piano e con lampada a ioduri metallici.



Figura 49 Impianto con apparecchio con vetro curvo e con lampada a ioduri metallici.

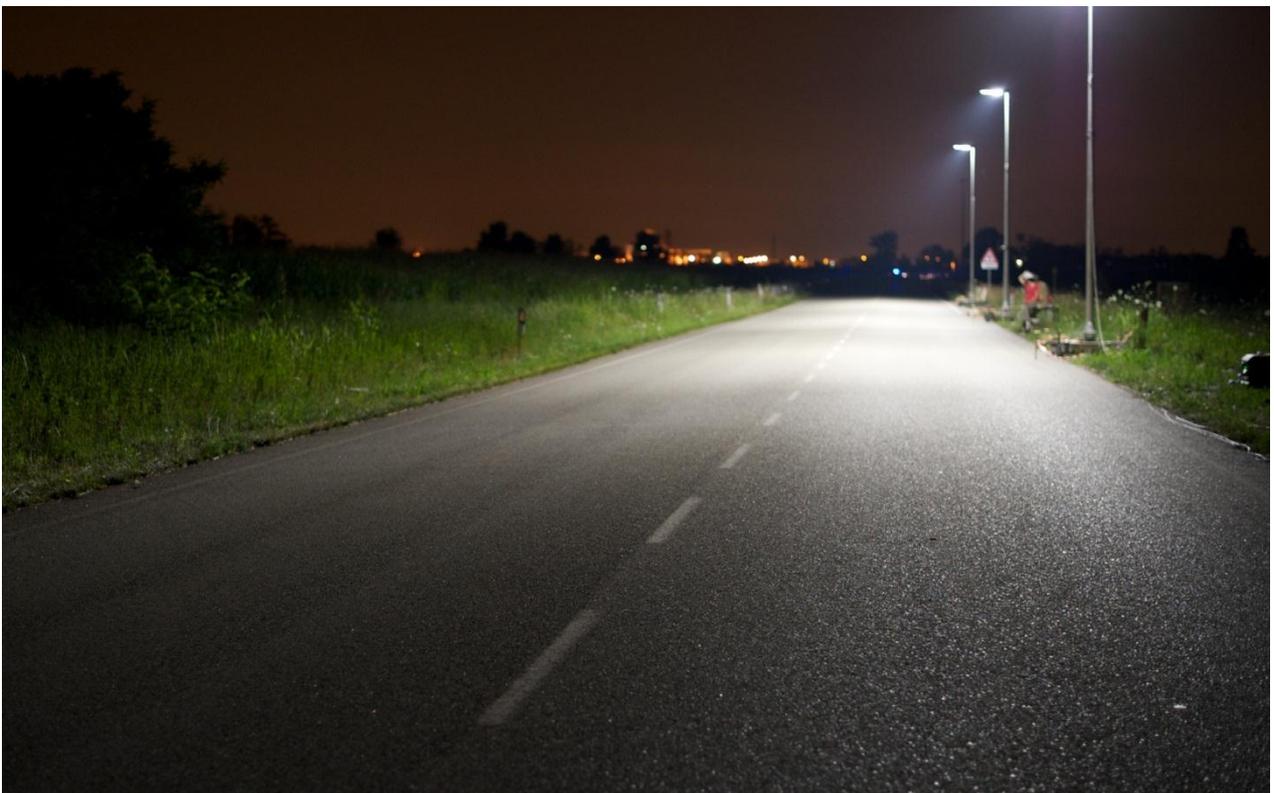


Figura 50 Impianto con apparecchio con vetro piano e con sorgenti LED.



Figura 51 Impianto con apparecchio con vetro curvo e con sorgenti LED.

Tabella 9 Risultati delle misure di illuminamento per gli impianti nel sito di Marcallo con Casone.

Parametri qualitativi	Unità di misura	Tipologia di impianto Installazione Marcallo							
		Griglia di Misura				Griglia normativa			
		Sorgente luminosa							
		Ioduri metallici		LED		Ioduri metallici		LED	
		Tipologia di vetro							
		Piano	Curvo	Piano	Curvo	Piano	Curvo	Piano	Curvo
		Modello							
		SGS253		SENS02		SGS253		SENS02	
		Illuminamento medio	[lx]	15,0	14,0	15,8	14,8	15,0	14,0
Uniformità [min/med]	[1]	0,35	0,25	0,39	0,41	0,35	0,25	0,39	0,41
Uniformità lungo linea centrale corsia marcia [min/max]	[1]	0,19	0,11	0,28	0,23	0,19	0,11	0,28	0,23
Uniformità lungo linea corsia sorpasso [min/max]	[1]	0,31	0,23	0,38	0,37	0,31	0,23	0,38	0,37

Tabella 10 Risultati delle misure di luminanza per gli impianti nel sito di Marcallo con Casone.

Parametro	Condizione	Simbolo	Unità di misura	Apparecchio di illuminazione			
				Sorgente luminosa			
				Ioduri Metallici		LED	
				Tipologia vetro			
				Piano	Curvo	Piano	Curvo
				Modello			
				SGS253	SGS253	SENSO2	SENSO2
Luminanza zona di misura	Media: Osservatore corsia di marcia	$L_{med,marcia,c}$	[cd m ⁻²]	1,16	1,14	1,40	1,47
	Media: Osservatore corsia di sorpasso	$L_{med,sorpasso,c}$	[cd m ⁻²]	1,29	1,05	1,52	1,51
Uniformità generale di luminanza	Osservatore corsia di marcia	$U_{o,L,marcia}$	[1]	0,38	0,42	0,45	0,41
	Osservatore corsia di sorpasso	$U_{o,L,sorpasso}$	[1]	0,35	0,47	0,43	0,46
Uniformità longitudinale	Osservatore corsia di marcia	$U_{i,L,marcia}$	[1]	0,56	0,34	0,72	0,71
	Osservatore corsia di sorpasso	$U_{i,L,sorpasso}$	[1]	0,54	0,36	0,80	0,68
Illuminamento	Medio	E_{med}	[lx]	15,03	13,73	15,80	14,77
Coefficiente di luminanza dell'impianto	Osservatore corsia di marcia	$Q_{i,marcia}$	[sr ⁻¹]	0,077	0,083	0,089	0,100
	Osservatore corsia di sorpasso	$Q_{i,sorpasso}$	[sr ⁻¹]	0,086	0,076	0,096	0,102

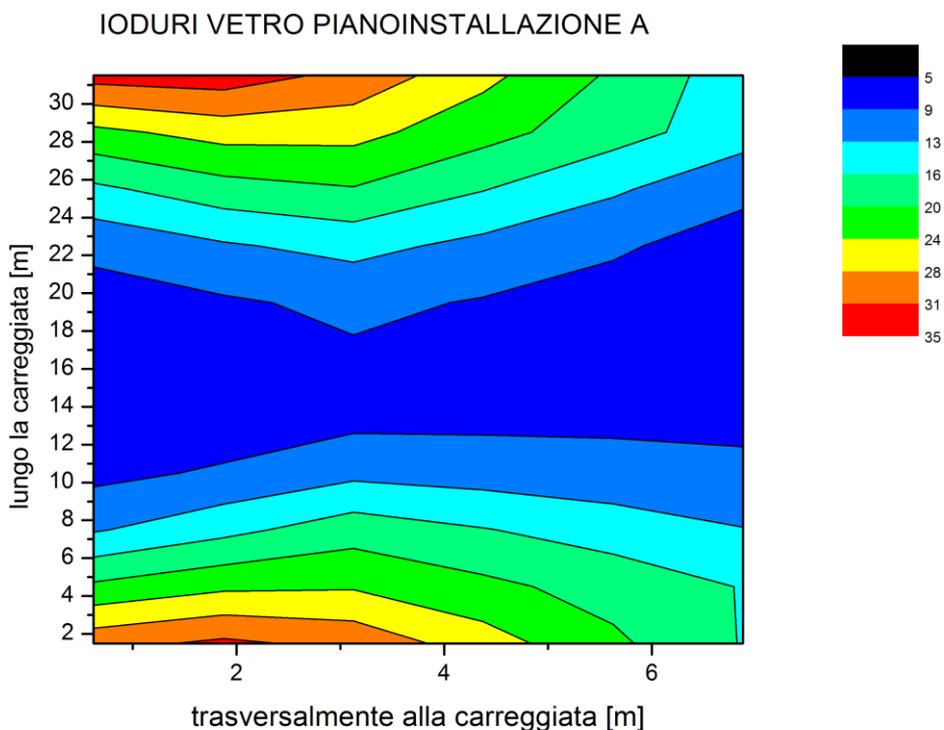


Figura 52 Curve isolux dell'impianto con apparecchio con vetro piano e con lampada a ioduri metallici.

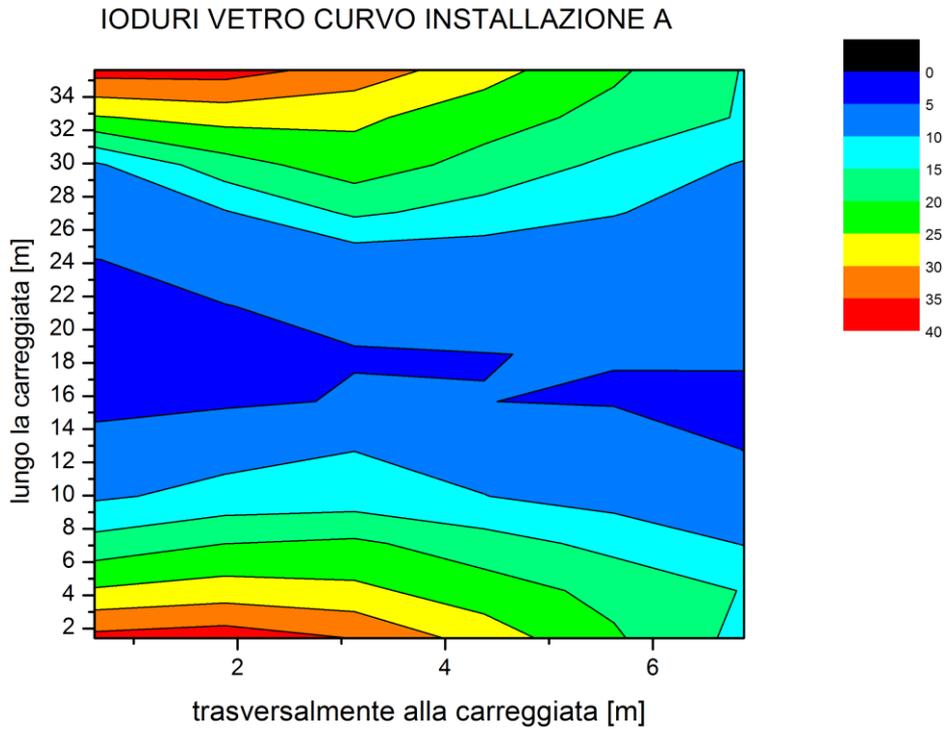


Figura 53 Curve isolux dell'impianto con apparecchio con vetro curvo e con lampada a ioduri metallici.

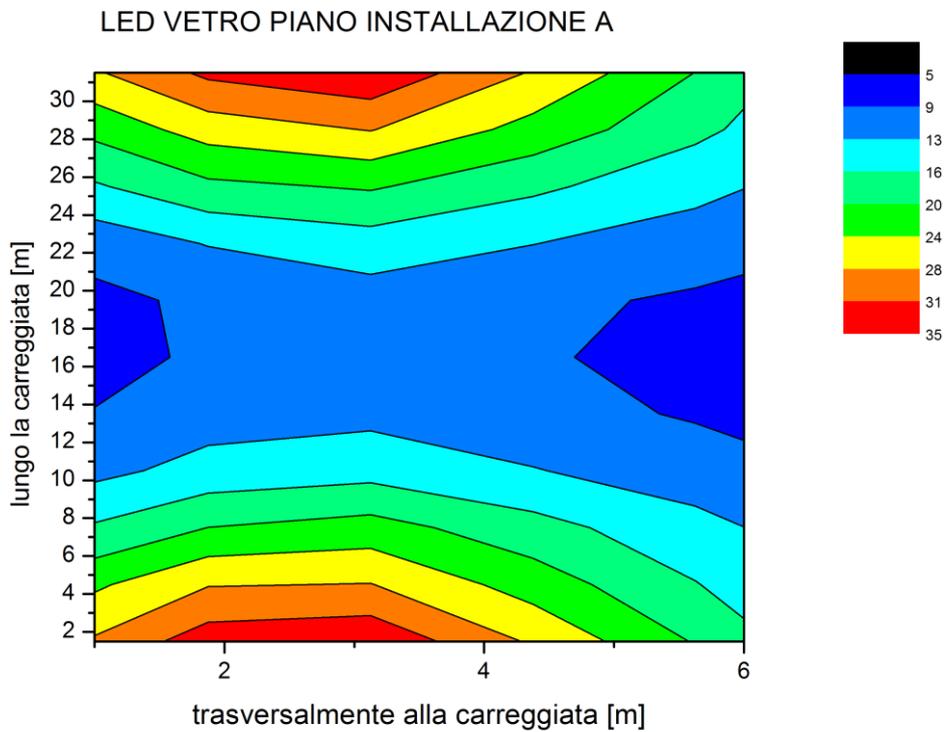


Figura 54 Curve isolux dell'impianto con apparecchio con vetro piano e con sorgenti LED.

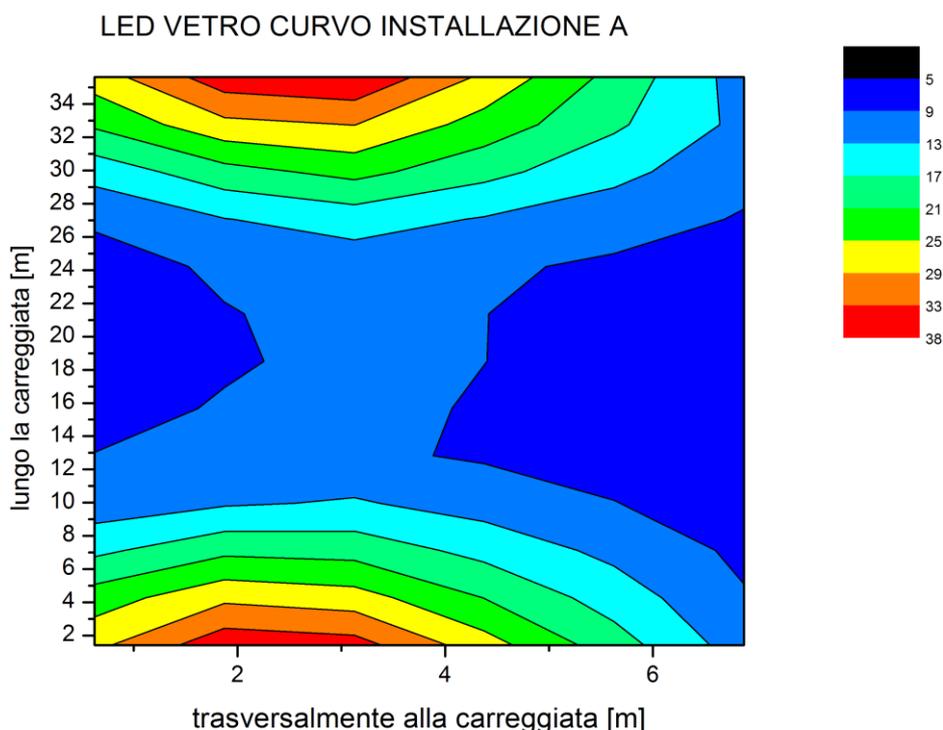


Figura 55 Curve isolux dell'impianto con apparecchio con vetro curvo e con sorgenti LED.

8.1.2. Impianti installati nel sito INRIM

Nelle figure da Figura 56 a Figura 57 sono visualizzate le condizioni di illuminazione degli impianti installati in INRIM.

Gli impianti erano composti da un solo apparecchio.

La griglia normativa corrisponde a quella definita per gli impianti di Marcallo con Casone, considerando l'unico apparecchio presente come il secondo di questi impianti.

Sono state poi definite due condizioni di misura, con le convenzioni di cui sopra, la prima corrisponde alla griglia normativa mentre la seconda corrisponde alla griglia di misura degli impianti di Marcallo.

In questo modo, applicando la sovrapposizione degli effetti e considerando i due apparecchi mancanti uguali a quello presente, è stato possibile, dalle misure, calcolare i parametri di illuminamento per tutti i punti della griglia normativa simulando la presenza di tre apparecchi. Questa condizione serve come riferimento per confrontare le condizioni delle due installazioni di Marcallo ed INRIM.

Le misure di luminanza sono state invece eseguite esclusivamente sui punti della seconda griglia di misura con osservatore posto a 60 m.

La Tabella 11 riporta i risultati delle misure relative all'illuminamento.

Per la luminanza i risultati sono riportati in Tabella 12. Si riferiscono alla griglia di misura della seconda condizione.

Osservando il coefficiente di luminanza dell'impianto e quello delle misure di Marcallo con Casone appare evidente il contributo alla luminanza degli apparecchi limitrofi che, sfruttando la riflessione speculare dell'asfalto, incrementano la luminanza, ma

contribuiscono in modo limitato all'illuminamento.

Nella Tabella 13 è indicato il fattore di riflessione del manto stradale e del prato nella condizione illuminazione 30° e osservazione normale alla superficie. L'illuminazione è stata ottenuta con sorgente analoga a quella usata per gli impianti di illuminazione.

Le curve isolux dei 4 impianti, riferite alla griglia normativa, sono diagrammate nei grafici da Figura 58 a Figura 59.



Figura 56 Impianto con apparecchio con vetro curvo e con lampada a ioduri metallici.



Figura 57 Impianto con apparecchio con vetro piano e con sorgenti LED.

Tabella 11 Risultati delle misure di illuminamento per gli impianti nel sito INRIM.

Parametri qualitativi	Unità di misura	Tipologia di impianto Installazione Torino											
		Condizione di Misura 1				Condizione di Misura 2				Situazione tre apparecchi			
		Sorgente luminosa											
		Ioduri metallici		LED		Ioduri metallici		LED		Ioduri metallici		LED	
		Tipologia di vetro											
		Pi ano	Cur vo	Pi ano	Cur vo	Pi ano	Cur vo	Pi ano	Cur vo	Pi ano	Cur vo	Pi ano	Cur vo
		Modello											
		SGS253		SENSO2		SGS253		SENSO2		SGS253		SENSO2	
Illuminamento medio	[lx]	8,2	7,7	7,4	7,2	13,1	12,4	11,2	10,7	16,3	15,4	15,2	14,5
Uniformità [min/med]	[1]	0,021	0,017	0,026	0,033	0,052	0,029	0,044	0,025	0,35	0,29	0,44	0,43
Uniformità lungo linea centrale corsia A [min/max]	[1]	0,005	0,004	0,007	0,008	0,020	0,010	0,017	0,008	0,20	0,15	0,35	0,32
Uniformità lungo linea centrale corsia B [min/max]	[1]	0,008	0,005	0,016	0,015	0,026	0,014	0,020	0,009	0,38	0,30	0,38	0,33

Tabella 12 Risultati delle misure di luminanza per gli impianti nel sito INRIM

Parametro	Condizione	Simbolo	Unità di misura	Apparecchio di illuminazione	
				Sorgente luminosa	
				Ioduri Metallici	LED
				Tipologia vetro	
				Curvo	Piano
				Modello	
				SGS253	SENSO2
Luminanza zona di misura	Media: Osservatore corsia di marcia	$L_{med,marcia,c}$	[cd m ⁻²]	0,63	0,64
Uniformità generale di luminanza	Osservatore corsia di marcia	$U_{o,L,marcia}$	[1]	0,101	0,208
Uniformità longitudinale	Osservatore corsia di marcia	$U_{l,L,marcia}$	[1]	0,062	0,172
Illuminamento zona di misura	Medio	E_{med}	[lx]	12,40	11,20
Coefficiente di luminanza dell'impianto	Osservatore corsia di marcia	$Q_{i,marcia}$	[sr ⁻¹]	0,051	0,057

Tabella 13 Fattori di riflessione medio delle superfici illuminate nel sito INRIM

Parametro	Condizione	Simbolo	Unità di misura	Apparecchio di illuminazione	
				Sorgente luminosa	
				Ioduri Metallici	LED
Fattore di riflessione	Carreggiata	$r_{carreggiata}$	[1]	0,18	0,15
	Prato	r_{prato}	[1]	0,10	0,074

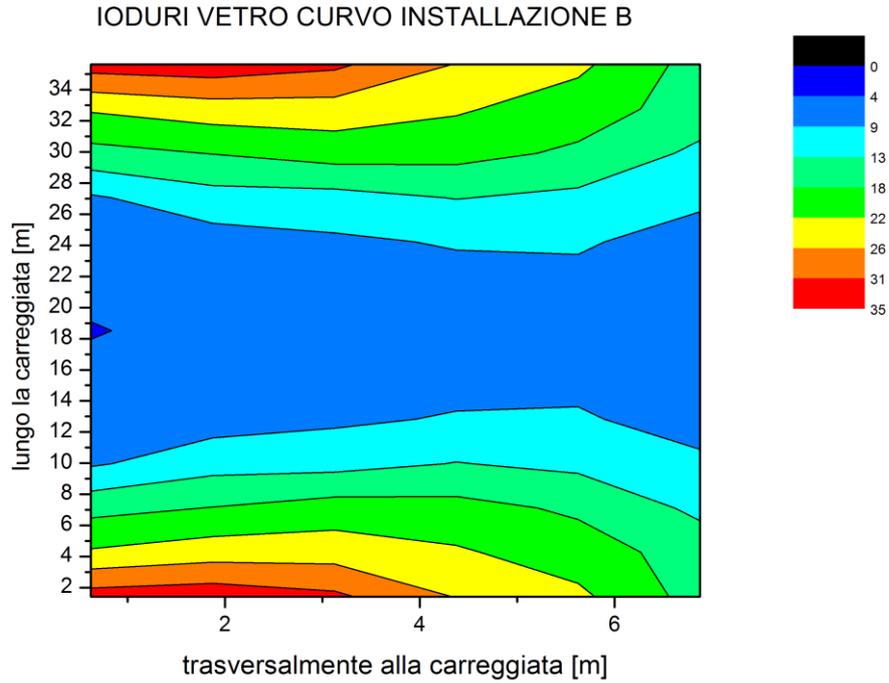


Figura 58 Curve isolux dell'impianto con apparecchio con vetro curvo e lampada a ioduri metallici.

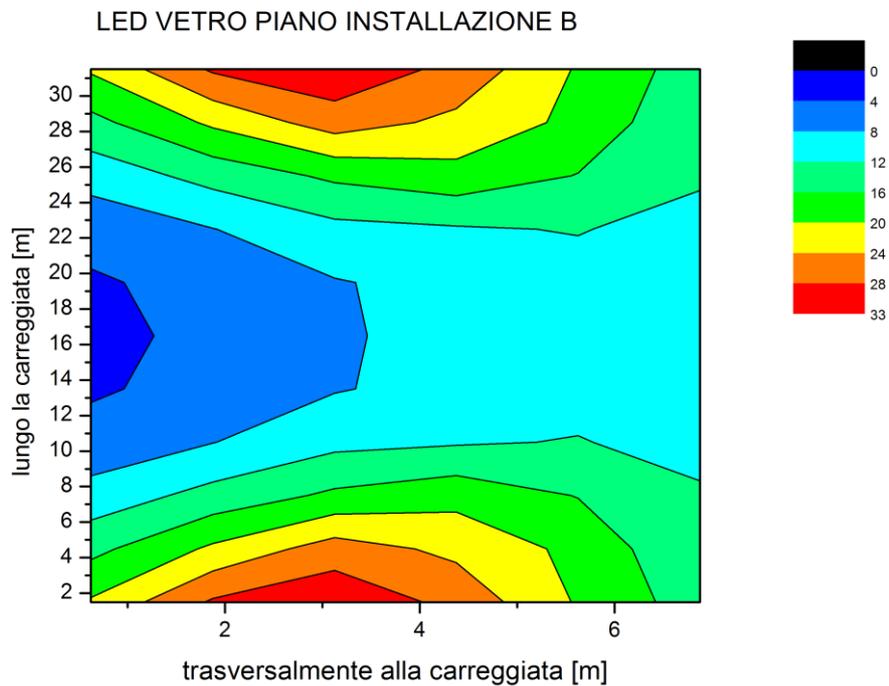


Figura 59 Curve isolux dell'impianto con apparecchio con vetro piano e con sorgenti LED.

8.2. Caratterizzazione dall'alto

8.2.1. Impianti installati nel sito di Marcallo con Casone

Per le condizioni di turbolenza atmosferica sull'installazione di Marcallo con Casone è stato eseguito un solo volo di prova con i due impianti con lampade a ioduri metallici accesi. Esempi delle immagini acquisite sono riportati nelle figure da Figura 60 a Figura 61.

Le condizioni di volo non hanno permesso di acquisire immagini utili per la successiva elaborazione fotometrica. Inoltre la difficoltà e pericolosità di pilotaggio ha consigliato ad Aerials Projects di sospendere il volo già al termine della prima spirale programmata.



Figura 60 Acquisizione degli impianti nel sito di Marcallo con Casone durante il volo di prova.

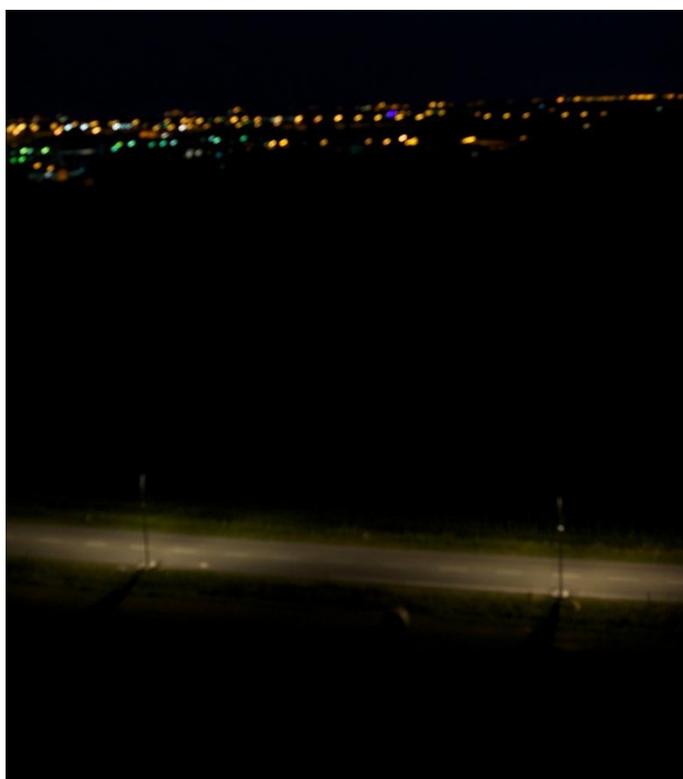


Figura 61 Acquisizione degli impianti nel sito di Marcallo con Casone durante il volo di prova.

8.2.2. Impianti installati nel sito INRIM

Nel caso degli impianti installati presso il sito INRIM si è proceduto con due campagne di misure. La presenza di alberi ed edifici non ha permesso la caratterizzazione a distanza elevata come inizialmente programmato.

Nella prima si è proceduto con misure su una circonferenza di circa 100 m di diametro e a una quota adatta a misurare la radiazione emessa fino a circa 20° rispetto all'orizzontale.

Nella seconda si è sorvolato l'impianto compiendo una spirale sulla strada ove era installato con lunghezza di circa 70 m e la larghezza 25 m dall'altezza dell'apparecchio fino allo zenit

I voli, eseguiti con l'elicottero descritto al §6 hanno permesso di acquisire immagini utili per la successiva elaborazione fotometrica.

Una prima acquisizione completa eseguita con apparecchio spento ha permesso di acquisire nel dettaglio la luminanza ambientale dovuta alla presenza di sorgenti di luce esterne alla zona di misura. Un luxmetro a terra, schermato rispetto alla sorgente in misura, ha registrato il livello di illuminamento ambientale per tutto il periodo delle prove. Per ogni singola prova le variazioni si sono mantenute entro il 2% del valore medio.

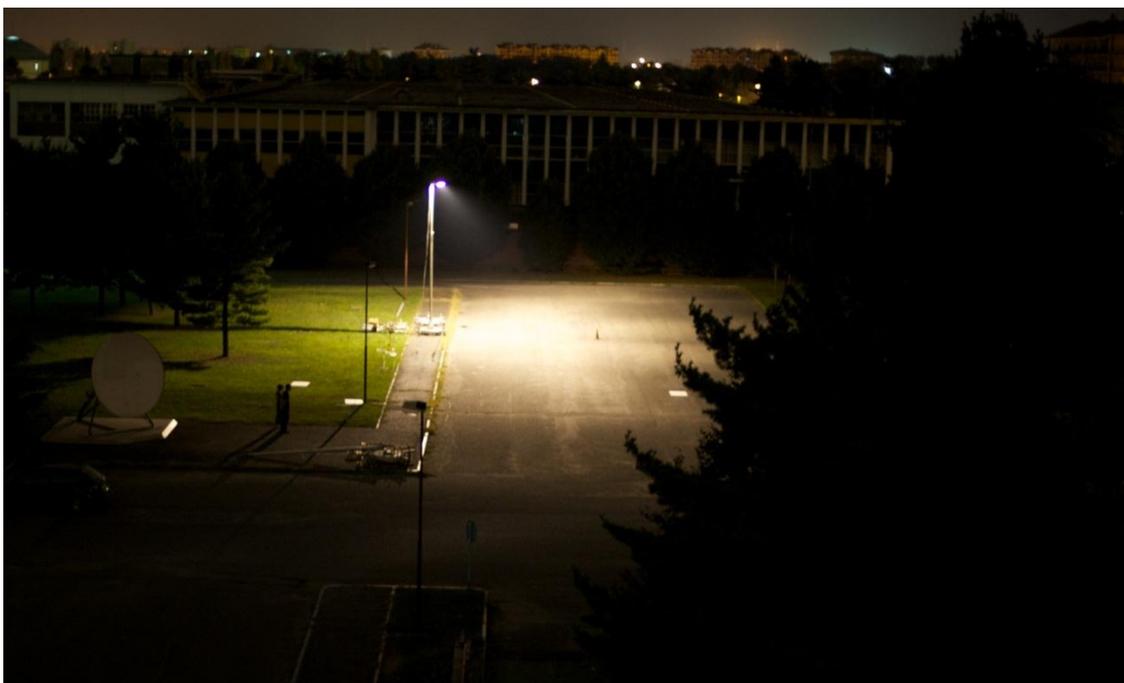


Figura 62 Impianto con apparecchio con vetro curvo e con lampada a ioduri metallici – primo esempio di acquisizione dall'alto – immagine fotografica.

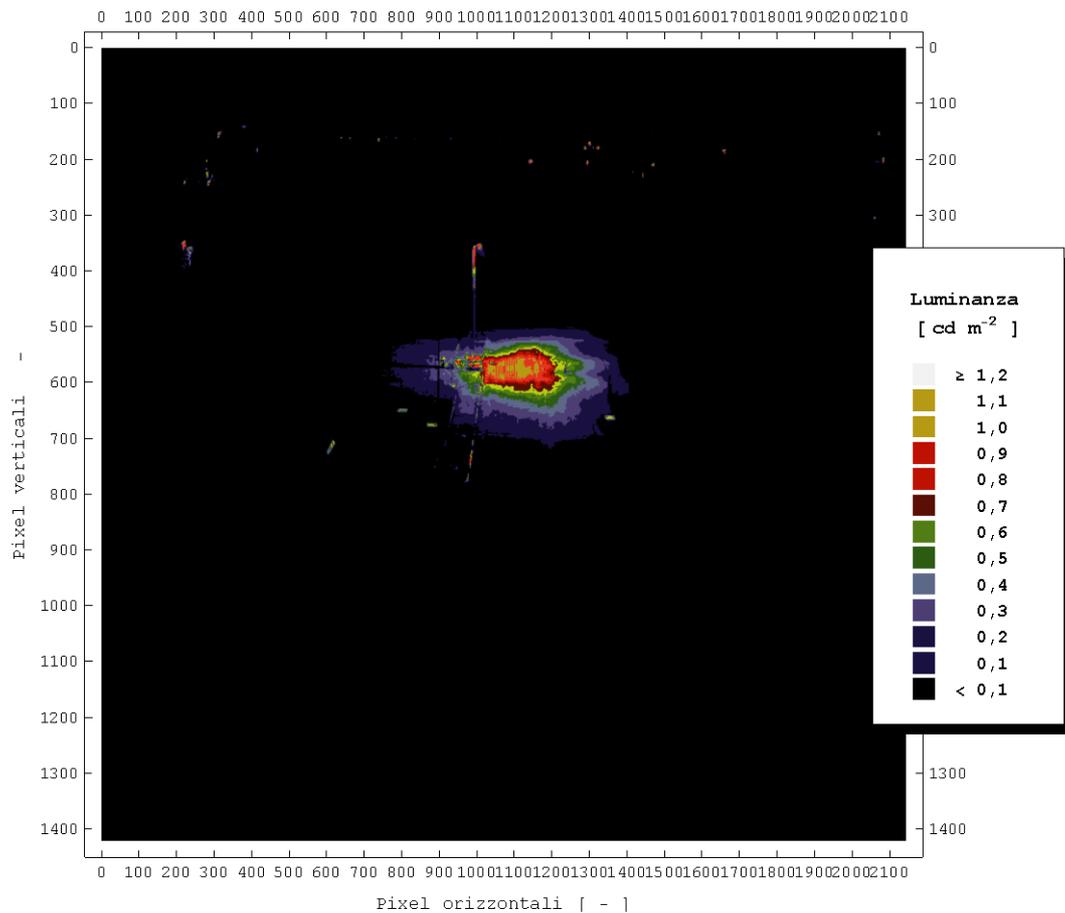


Figura 63 Impianto con apparecchio con vetro curvo e con lampada a ioduri metallici – primo esempio di acquisizione dall'alto – immagine a falsi colori.

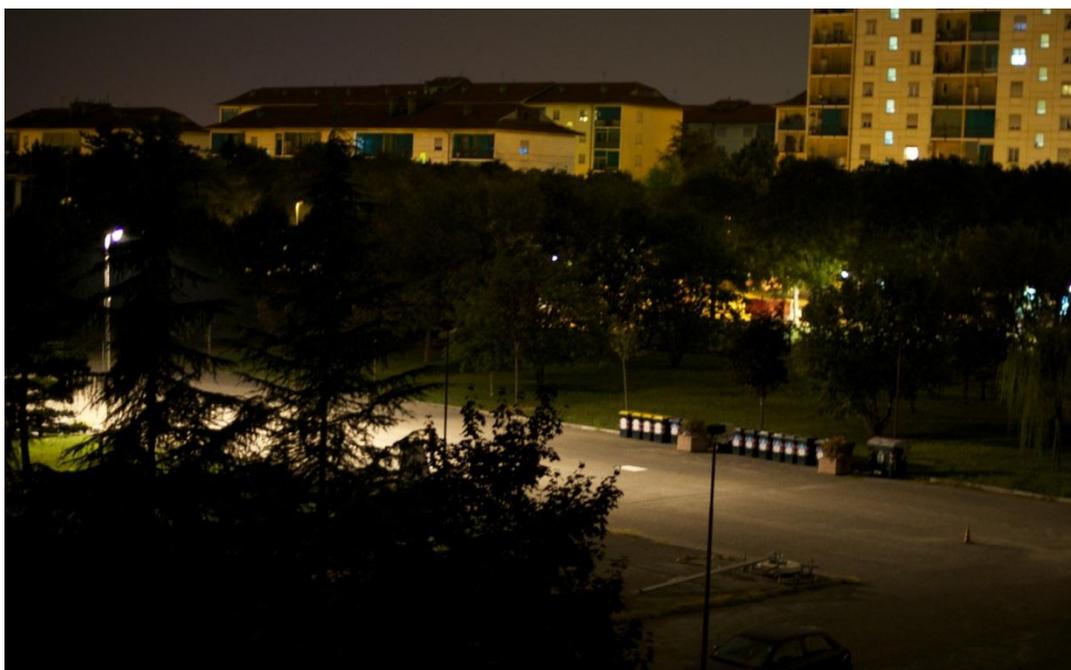


Figura 64 Impianto con apparecchio con vetro curvo e con lampada a ioduri metallici – secondo esempio di acquisizione dall'alto – immagine fotografica.

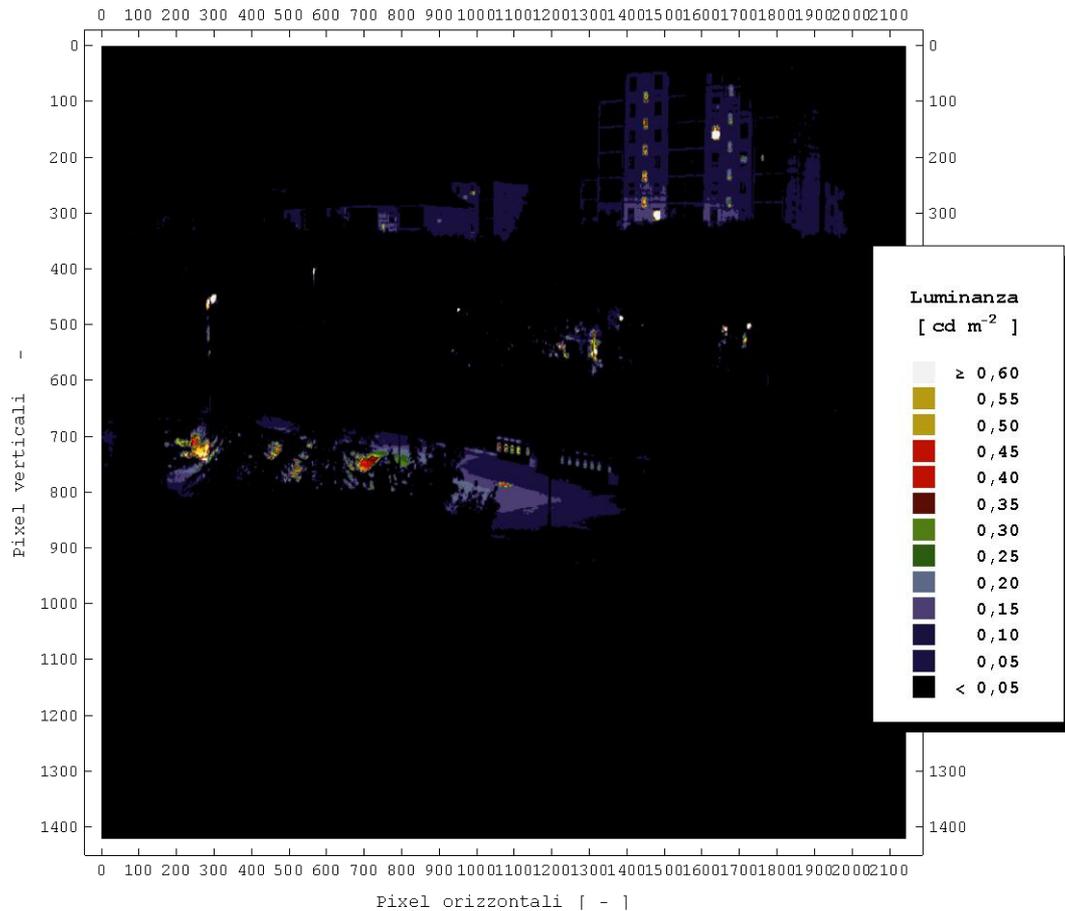


Figura 65 Impianto con apparecchio con vetro curvo e con lampada a ioduri metallici – secondo esempio di acquisizione dall’alto – immagine a falsi colori.



Figura 66 Impianto con apparecchio con vetro curvo e con lampada a ioduri metallici – terzo esempio di acquisizione dall’alto – immagine fotografica.

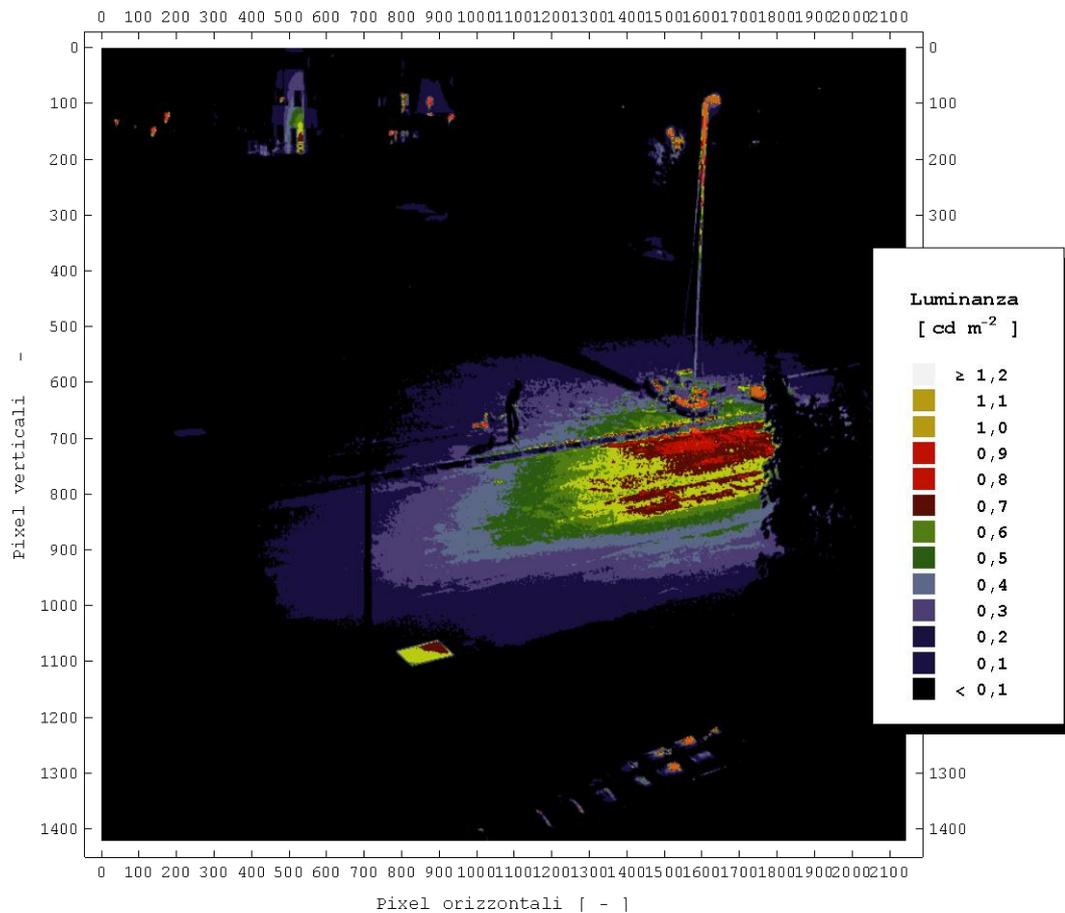


Figura 67 Impianto con apparecchio con vetro curvo e con lampada a ioduri metallici – terzo esempio di acquisizione dall’alto – immagine a falsi colori.



Figura 68 Impianto con apparecchio con vetro piano e con sorgenti LED – primo esempio di acquisizione dall’alto – immagine fotografica.

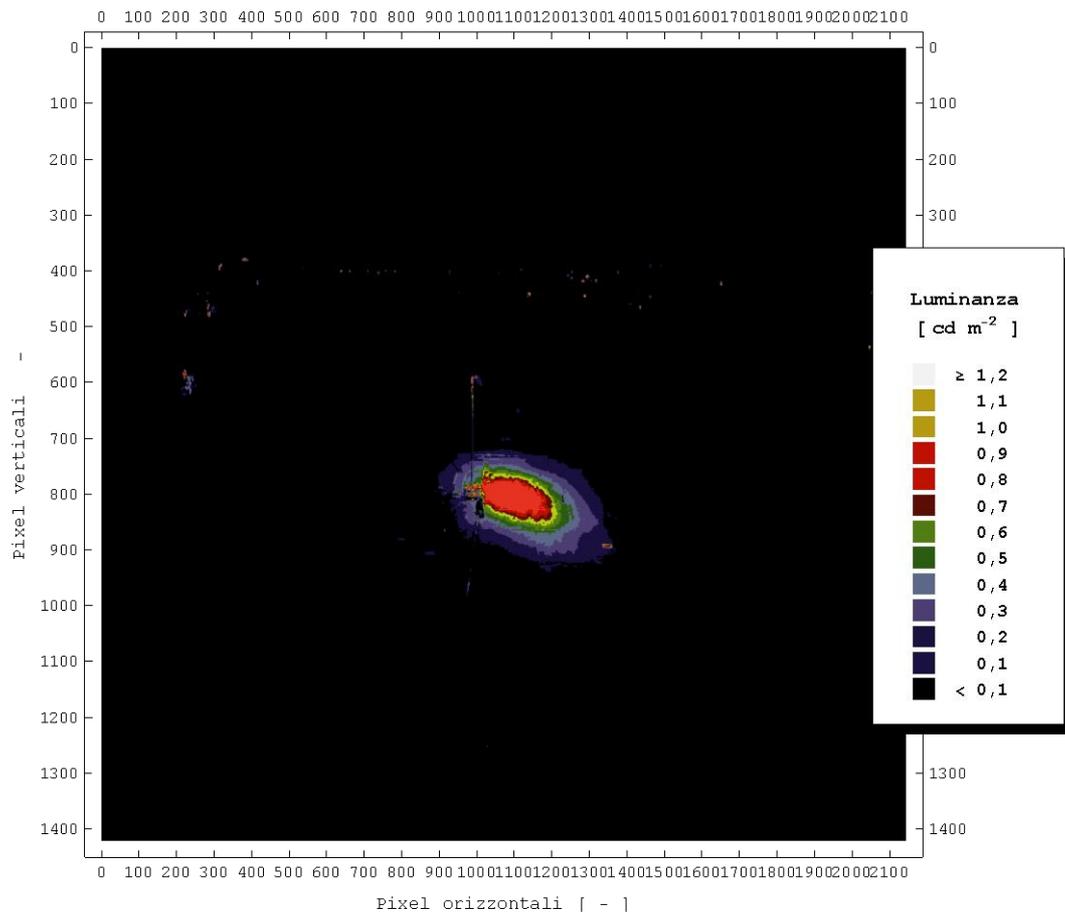


Figura 69 Impianto con apparecchio con vetro piano e con sorgenti LED – primo esempio di acquisizione dall’alto – immagine a falsi colori.



Figura 70 Impianto con apparecchio con vetro piano e con sorgenti LED – secondo esempio di acquisizione dall’alto – immagine fotografica.

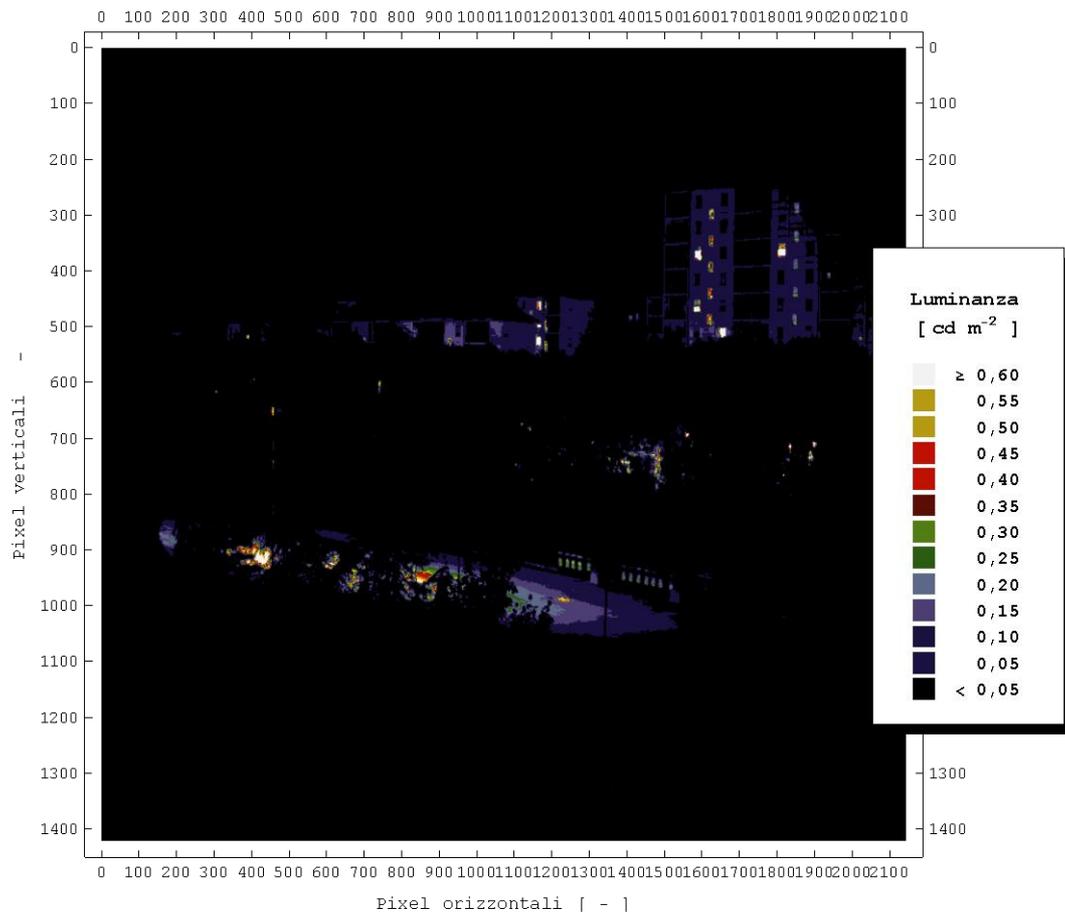


Figura 71 Impianto con apparecchio con vetro piano e con sorgenti LED – secondo esempio di acquisizione dall’alto – immagine a falsi colori.



Figura 72 Impianto con apparecchio con vetro piano e con sorgenti LED – terzo esempio di acquisizione dall’alto – immagine fotografica.

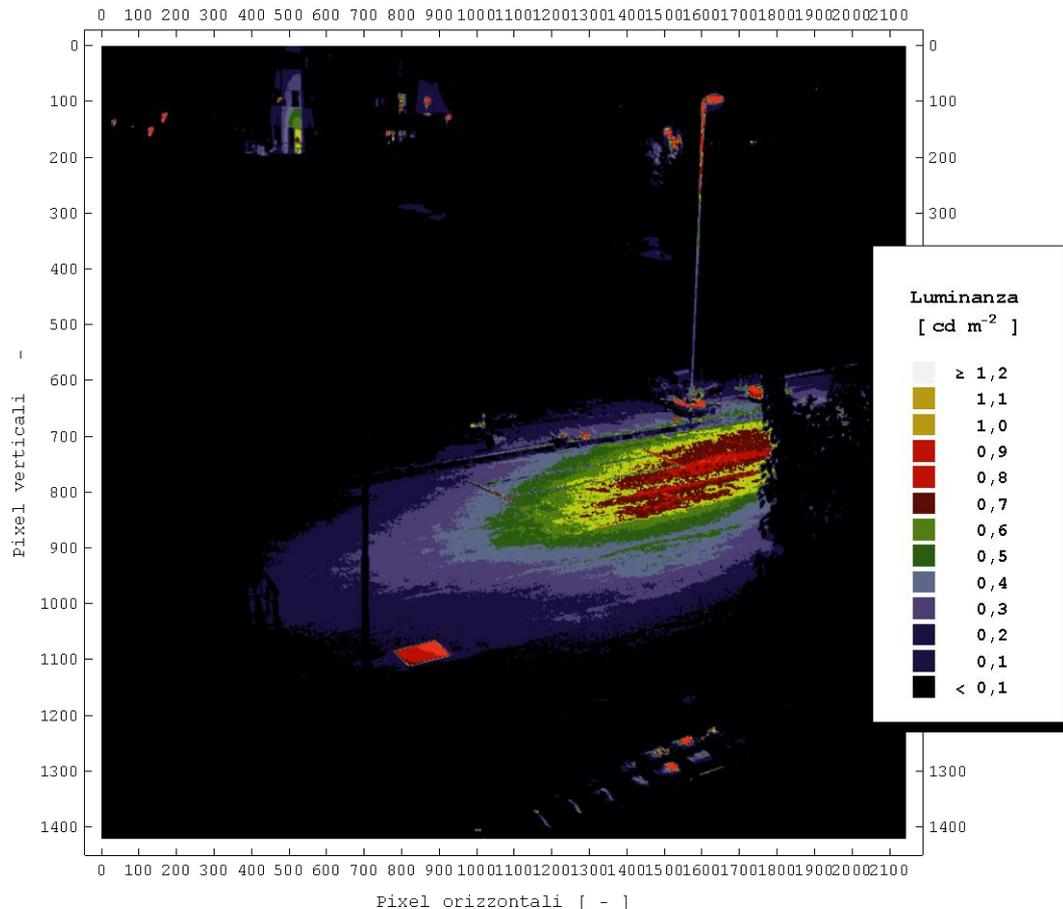


Figura 73 Impianto con apparecchio con vetro piano e con sorgenti LED – terzo esempio di acquisizione dall’alto – immagine a falsi colori.

9. RISULTATI DELLE CARATTERIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI INRIM DALL’ALTO

9.1. Elaborazione delle acquisizioni

Come già indicato, durante il sorvolo dell’impianto sono state acquisite misure di luminanza e misure di illuminamento orizzontale (superficie sensibile del sensore rivolta verso il basso) in modo sincrono.

Dalle misure di luminanza acquisite a differenti quote e su differenti superfici inquadrature, si è proceduto con la seguente procedura di elaborazione:

- individuazione della superficie inquadrata;
- definizione delle condizioni geometriche di misura (distanza, quota, angolo di visione);
- estrazione della parte utile del campo inquadrato;
- calcolo della luminanza, con riferimento alle condizioni di taratura;
- ricostruzione della matrice della ripartizione della luminanza;
- interpolazione per le direzioni e superfici non misurate o coperte da ostacoli.

Le superfici inquadrature sono state definite individuando, su ogni immagine, dei punti di riferimento corrispondenti a punti con coordinate note sul piano stradale e sulle aree limitrofe. Per via geometrica si è ricavata la posizione dell’ILMD e la direzione di acquisizione e si è verificata la compatibilità del risultato con i dati del GPS installato a

bordo del velivolo.

Le misure di illuminamento sono servite per validare il risultato di luminanza, compensare il risultato per il livello di luce ambientale e per interpolare i risultati per le direzioni angolari non adeguatamente coperte.

Nota la ripartizione della luminanza è stata calcolata la ripartizione dell'illuminamento dell'impianto considerando sia il contributo totale sia il contributo del solo apparecchio di illuminazione e delle superfici metalliche limitrofe (palo).

9.2. Ripartizione dell'intensità luminosa

La ripartizione dell'intensità luminosa, parametro normalmente usato per caratterizzare gli apparecchi di illuminazione, considera l'impianto come sorgente puntiforme e quindi può essere usato per calcoli illuminotecnici a distanze elevate rispetto alle dimensioni massime dell'impianto misurato.

Convenzionalmente si è posto il centro fotometrico nel punto di intersezione tra il piano stradale e la verticale passante per il centro fotometrico dell'apparecchio di illuminazione.

Il piano C0 è parallelo all'asse longitudinale della strada e corrisponde al piano C0 dell'apparecchio di illuminazione. Le direzioni γ sono riferite al piano della strada e seguendo la convenzione prevista per gli apparecchi di illuminazione sono comprese tra i valori $\gamma 90$ e $\gamma 180$.

Per come è stata scelto il centro fotometrico dell'impianto, l'emissione a $\gamma 90$ dell'apparecchio di illuminazione non corrisponde a $\gamma 90$, ma a un valore angolare leggermente più alto. Se si considera una distanza di calcolo di 2000 m (superiore a 10 volte la dimensione massima dell'impianto, come prescritto dalle norme per la caratterizzazione degli apparecchi di illuminazione), la differenza angolare tra le due direzioni vale circa $0,3^\circ$.

Il passo di calcolo della ripartizione dell'intensità luminosa è stato di 5° nelle direzioni γ e di 15° nei piani C.

L'incertezza di misura non è costante con le direzioni dipendendo anche dalle proporzioni tra dati misurati e dati interpolati. I valori sono compresi tra il 4% e 15%. Confrontando i dati ottenuti con i valori di illuminamento misurati durante l'acquisizione si è stimata una incertezza nel flusso luminoso emesso verso l'alto del 5%.

Per problemi operativi quasi tutti i valori per direzioni comprese tra $\gamma 90$ e $\gamma 97$ sono ottenuti per estrapolazione.

I risultati sono influenzati dalle proprietà in riflessione delle superfici illuminate e quindi dipendono dal sito di misura.

La ripartizione dell'intensità luminosa presenta un andamento quasi cosenico e con scarsa dipendenza dal piano C eccetto che per le direzioni inferiori a $\gamma 120$. In particolare l'apparecchio Senso 2 con vetro curvo manifesta una evidente differenza rispetto agli altri.

I risultati del contributo dell'apparecchio (comprensivo delle superfici limitrofe illuminate) e della ripartizione totale sono riportati nei grafici da Figura 74 a Figura 77 per il piano C0.

Esempi delle differenze tra i piani C sono riportati nei grafici da

Figura 78 a

Figura 81.

Nota la ripartizione dell'intensità luminosa è stato calcolato il flusso luminoso emesso

verso l'alto dall'intero impianto considerando sia il valore totale sia il flusso compreso nella zona sferica tra $\gamma 90$ e $\gamma 110$ ossia nei 20° più critici per l'inquinamento luminoso.

I risultati sono riportati in Tabella 14. Il flusso luminoso associato alla sorgente considera anche l'emissione delle superfici limitrofe e perciò è più alto rispetto ai valori misurati in laboratorio (Tabella 8). Sostanziale è la differenza tra apparecchi a ioduri e apparecchi a LED. Ciò è dovuto sia alla differente estensione della superficie illuminata sia al fattore di riflessione spettrale delle superfici illuminate che pesa in modo diverso lo spettro di emissione delle sorgenti.

Per facilitare i confronti nella tabella è riportato il flusso emesso verso l'alto normalizzato rispetto al flusso luminoso totale della sorgente espresso in kilolumen.

Per il singolo apparecchio, considerando il flusso totale nelle diverse zone sferiche specificate e considerando l'incertezza di misura non appaiono sostanziali differenze tra soluzioni a vetro piano o a vetro curvo, mentre il flusso luminoso emesso verso l'alto agli apparecchi a LED è inferiore di circa il 13% a quello degli apparecchi a ioduri.

Queste considerazioni sono confermate dal calcolo dell'efficienza luminosa riferita al solo flusso luminoso emesso verso l'alto dell'impianto. In questo caso più il valore è basso minore sarà, a parità di potenza di alimentazione, il flusso disperso complessivamente dall'impianto verso l'alto.

Noto il flusso luminoso emesso dalla lampada verso il basso e il flusso riflesso verso l'alto dalle superfici illuminate dall'impianto è possibile calcolare il valore del fattore di riflessione associato all'impianto stesso. Questo è fatto in Tabella 15, ove si sono considerate le usali zone sferiche.

Per semplicità è stato anche introdotto il coefficiente equivalente di riflessione definito come rapporto tra il flusso totale emesso verso l'alto dall'impianto e il flusso emesso verso il basso dall'apparecchio di illuminazione.

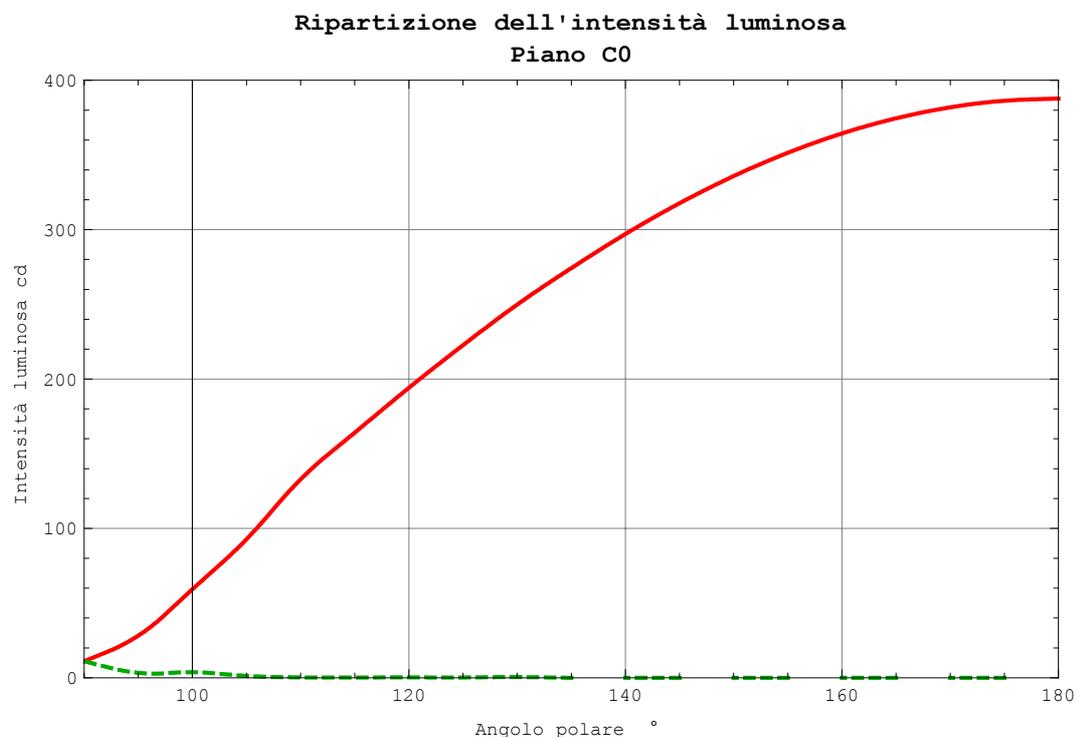


Figura 74 Impianto INRIM con apparecchio di illuminazione a ioduri metallici – vetro piano SGS253 – INRIM 8258: ripartizione dell'intensità luminosa sul piano C0. La linea tratteggiata in colore verde rappresenta il contributo dovuto all'apparecchio di

illuminazione e alle superfici limitrofe illuminate

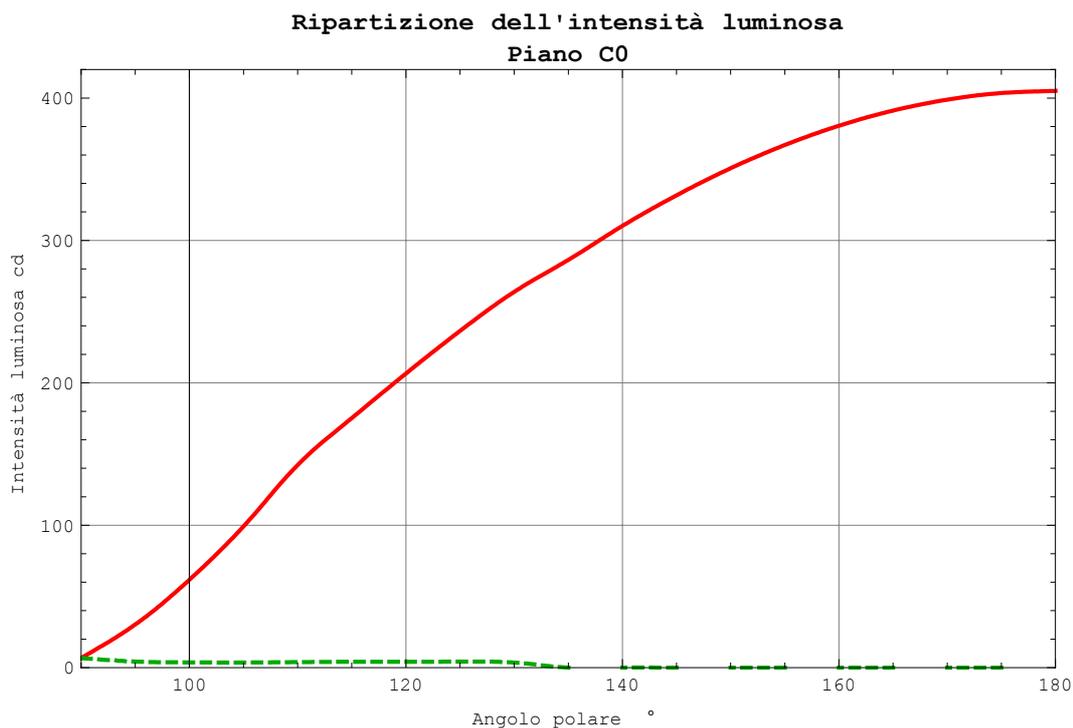


Figura 75 Impianto INRIM con apparecchio di illuminazione a ioduri metallici – vetro curvo SGS253 – INRIM 8259: ripartizione dell'intensità luminosa sul piano C0. La linea tratteggiata in colore verde rappresenta il contributo dovuto all'apparecchio di illuminazione e alle superfici limitrofe illuminate.

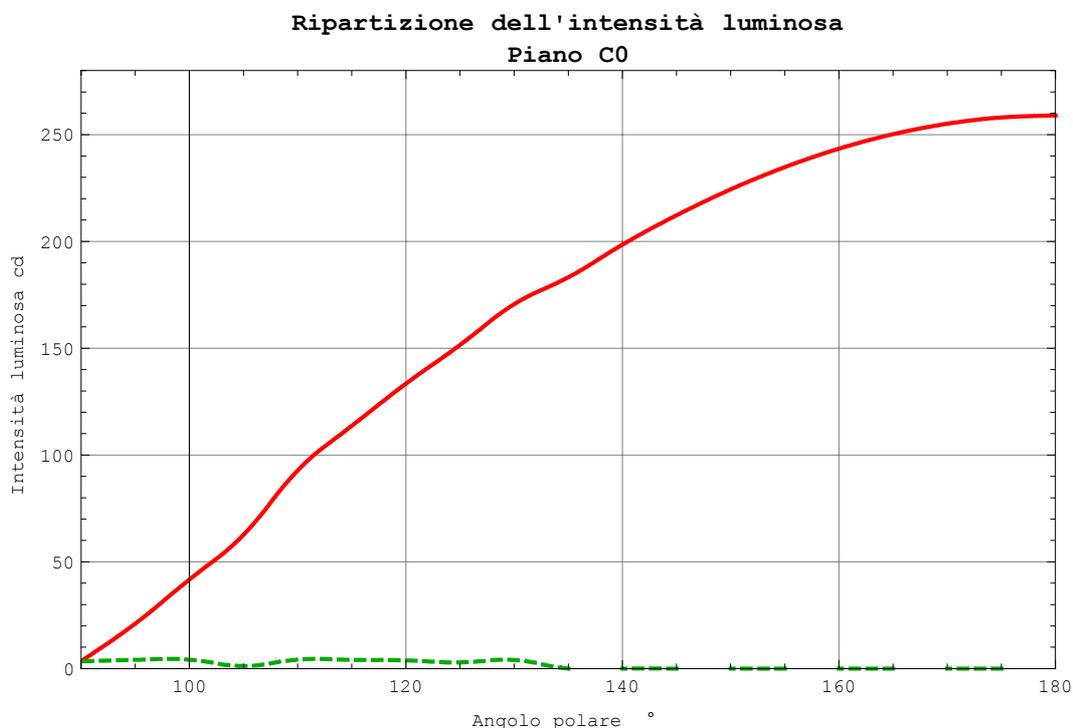


Figura 76 Impianto INRIM con apparecchio di illuminazione a LED – vetro piano SENSO2 – INRIM 8260: ripartizione dell'intensità luminosa sul piano C0. La linea tratteggiata in colore verde rappresenta il contributo dovuto all'apparecchio di illuminazione e alle superfici limitrofe illuminate.

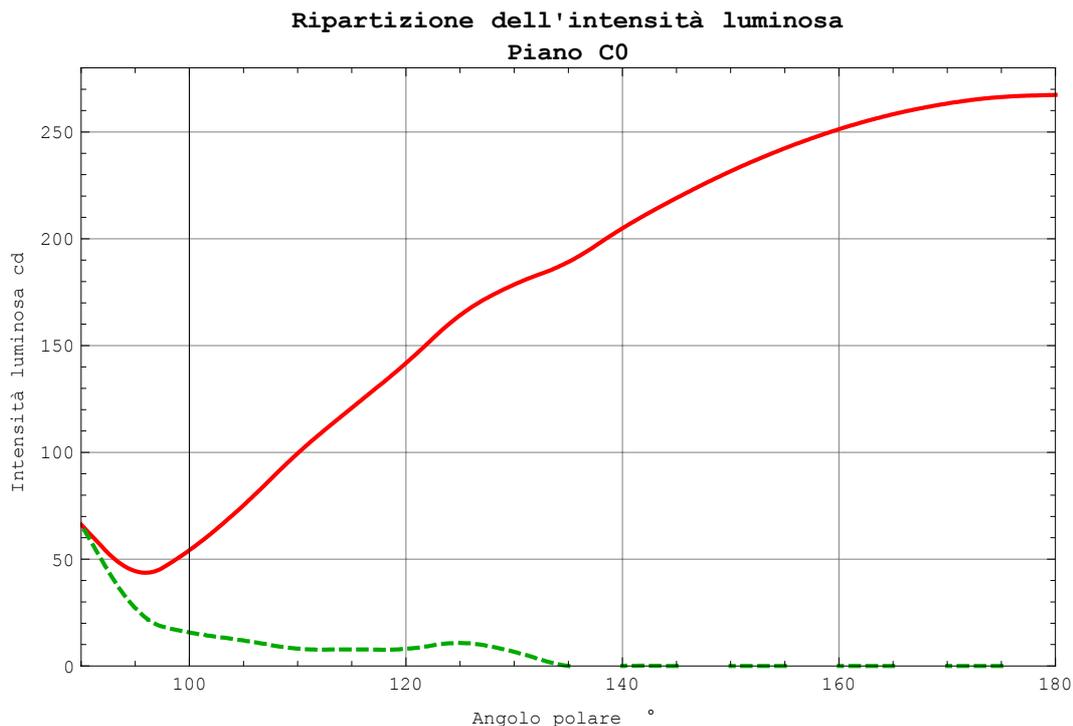


Figura 77 Impianto INRIM con apparecchio di illuminazione a LED – vetro curvo SENS02 – INRIM 8261: ripartizione dell'intensità luminosa sul piano C0. La linea tratteggiata in colore verde rappresenta il contributo dovuto all'apparecchio di illuminazione e alle superfici limitrofe illuminate.

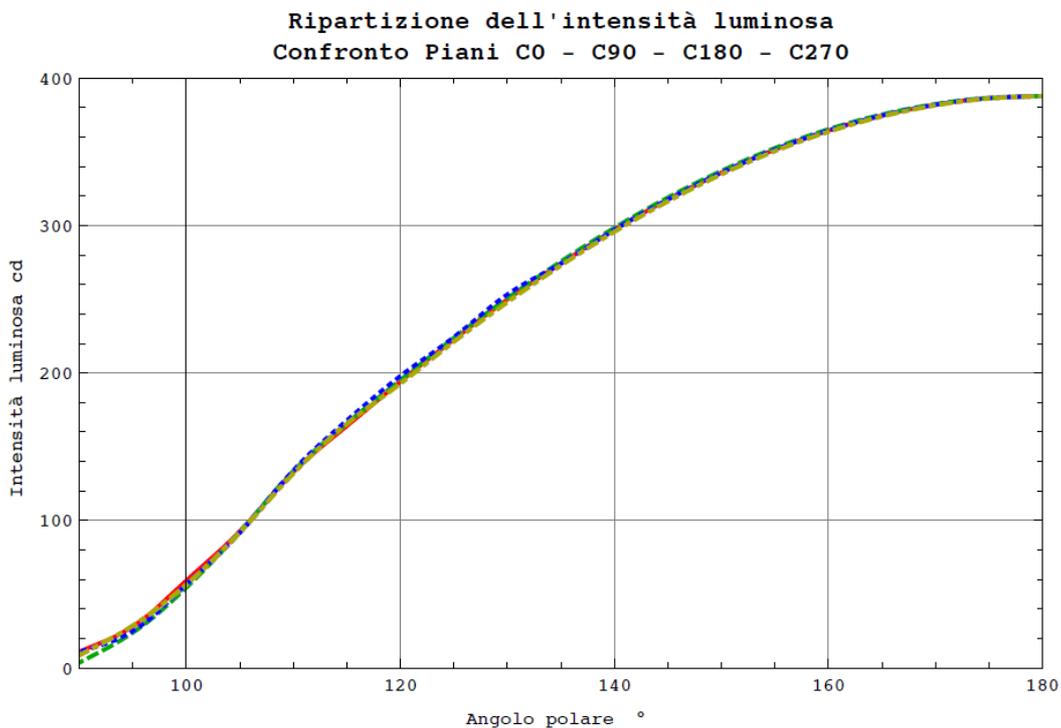


Figura 78 Impianto INRIM con apparecchio di illuminazione a ioduri metallici – vetro piano SGS253 – INRIM 8258: ripartizione dell'intensità luminosa nei piani C0 (Rosso), C90 (Verde), C180 (Blu), C270 (Giallo).

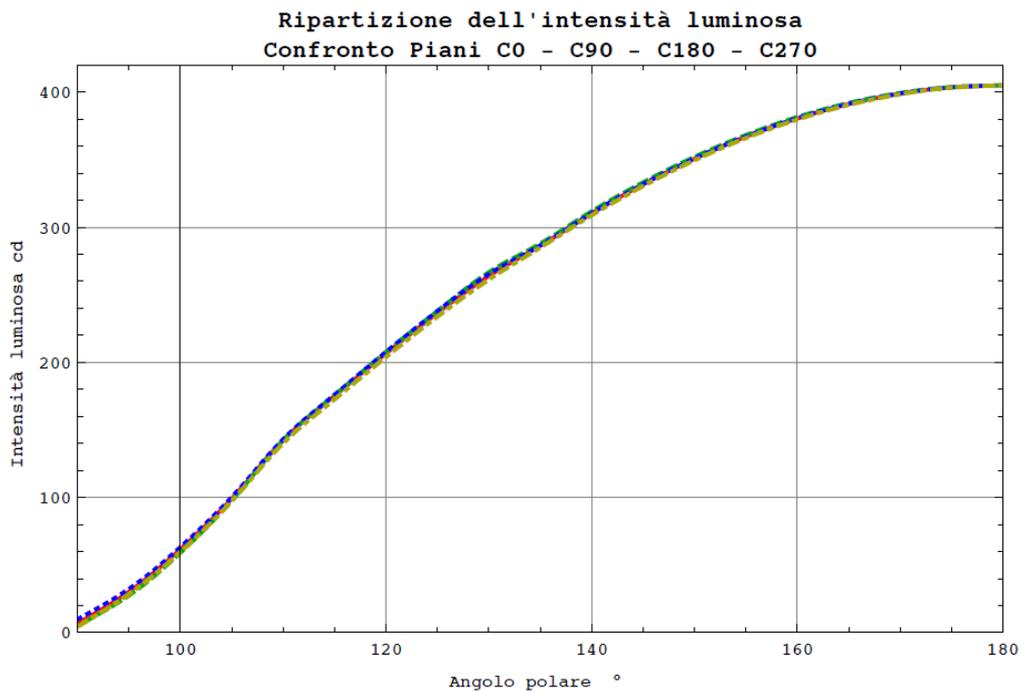


Figura 79 Impianto INRIM con apparecchio di illuminazione a ioduri metallici – vetro curvo SGS253 – INRIM 8259: ripartizione dell'intensità luminosa nei piani C0 (Rosso), C90 (Verde), C180 (Blu), C270 (Giallo).

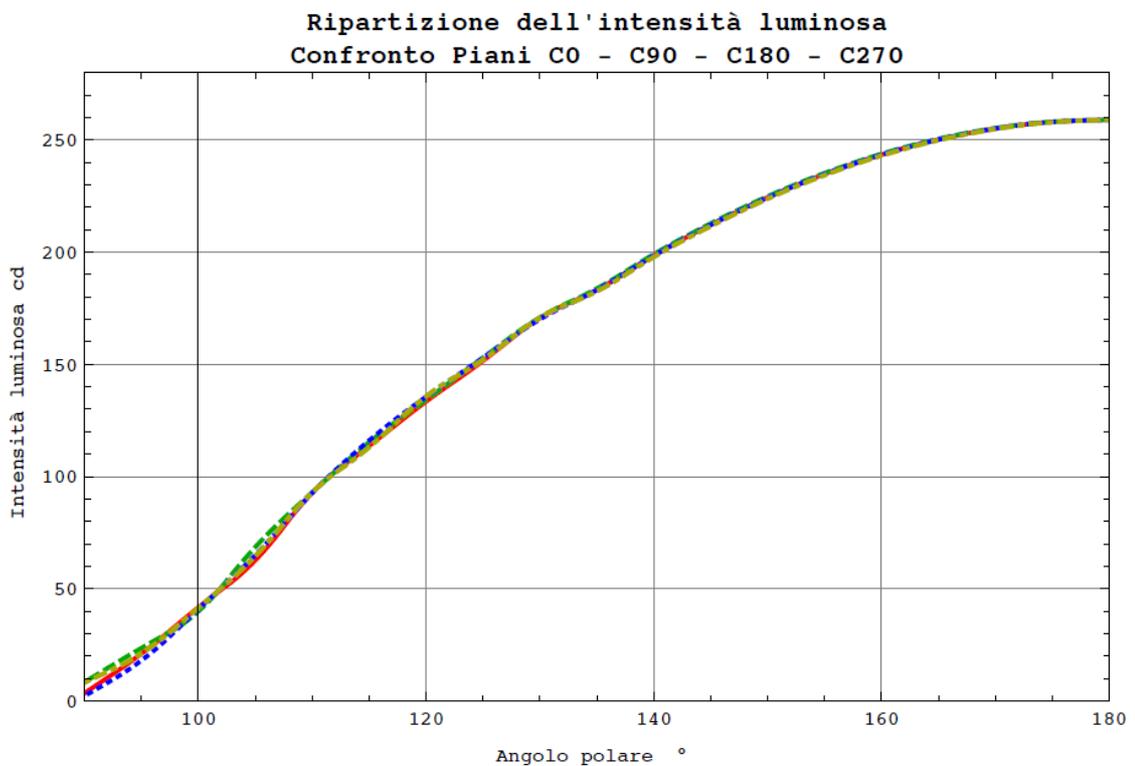


Figura 80 Impianto INRIM con apparecchio di illuminazione a LED – vetro piano SENSO2 – INRIM 8260: ripartizione dell'intensità luminosa nei piani C0 (Rosso), C90 (Verde), C180 (Blu), C270 (Giallo).

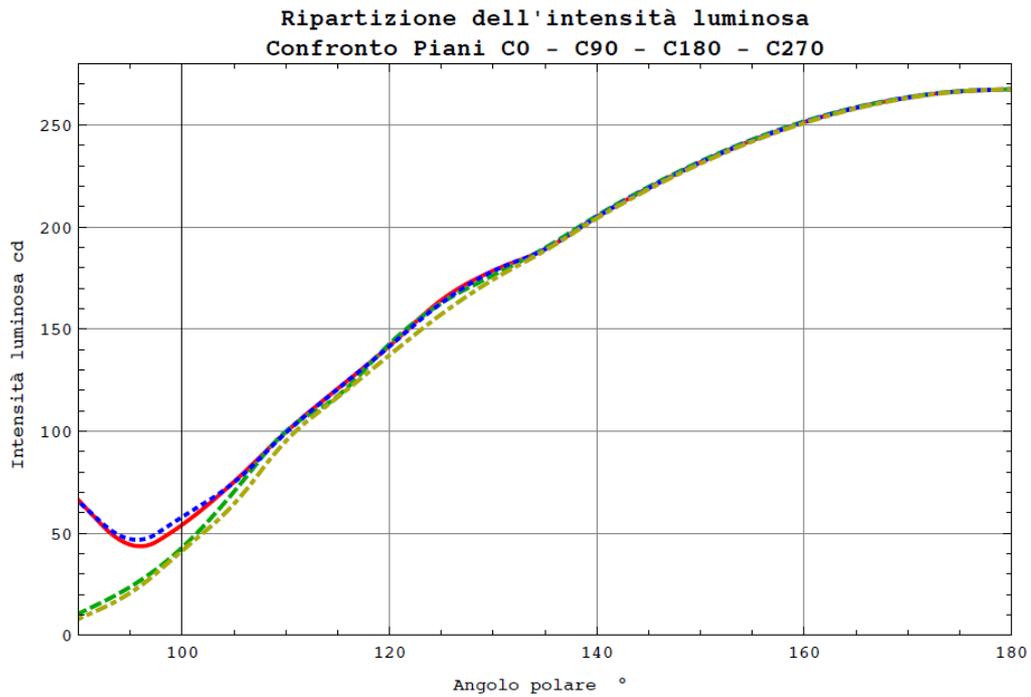


Figura 81 Impianto INRIM con apparecchio di illuminazione a LED – vetro curvo SENSO2 – INRIM 8261: ripartizione dell'intensità luminosa nei piani C0 (Rosso), C90 (Verde), C180 (Blu), C270 (Giallo).

Tabella 14 Flusso luminoso emesso verso l'alto dall'impianto INRIM.

#VALORE!	Simbolo	Unità di misura	Apparecchio di illuminazione							
			Sorgente luminosa							
			Ioduri Metallici				LED			
			Tipologia vetro							
			Piano		Curvo		Piano		Curvo	
			Modello							
			SGS253		SGS253		SENSO2		SENSO2	
			Codice INRIM							
			8258		8259		8260		8261	
			Sorgente	Totale	Sorgente	Totale	Sorgente	Totale	Sorgente	Totale
Flusso luminoso	f_{90-110}	[lm]	5,7 ± 0,3	132 ± 7	8,3 ± 0,4	143 ± 7	9,5 ± 0,5	93 ± 5	26 ± 1	112 ± 6
	$f_{110-180}$	[lm]	4,8 ± 0,2	1 080 ± 50	8,1 ± 0,4	1 130 ± 60	10,0 ± 0,5	730 ± 40	13,1 ± 0,7	750 ± 40
	f_{90-180}	[lm]	10,5 ± 0,5	1 210 ± 60	16,4 ± 0,8	1 270 ± 60	19,5 ± 1,0	820 ± 40	39 ± 2	870 ± 40
Flusso luminoso normalizzato rispetto al flusso totale della sorgente in kilolumen	$f_{n90-110}$	[l]	0,70 ± 0,04	16,3 ± 0,8	0,99 ± 0,05	17,0 ± 0,9	1,53 ± 0,08	15,1 ± 0,8	4,0 ± 0,2	17,3 ± 0,9
	$f_{n110-180}$	[l]	0,59 ± 0,03	133 ± 7	0,96 ± 0,05	134 ± 7	1,62 ± 0,08	118 ± 6	2,0 ± 0,1	116 ± 6
	$f_{n90-180}$	[l]	1,30 ± 0,06	150 ± 7	1,95 ± 0,10	151 ± 8	3,2 ± 0,2	133 ± 7	6,0 ± 0,3	133 ± 7
Efficienza luminosa riferita al flusso luminoso verso l'alto	h_{90-110}	[lm / W]	0,059 ± 0,004	1,36 ± 0,08	0,086 ± 0,005	1,48 ± 0,09	0,085 ± 0,005	0,83 ± 0,05	0,23 ± 0,01	1,01 ± 0,06
	$h_{110-180}$	[lm / W]	0,050 ± 0,003	11,2 ± 0,7	0,084 ± 0,005	11,7 ± 0,7	0,090 ± 0,005	6,5 ± 0,4	0,119 ± 0,007	6,8 ± 0,4
	h_{90-180}	[lm / W]	0,108 ± 0,007	12,5 ± 0,8	0,17 ± 0,01	13,2 ± 0,8	0,17 ± 0,01	7,3 ± 0,4	0,35 ± 0,02	7,8 ± 0,5

Tabella 15 Coefficienti di riflessione dell'impianto INRIM.

Parametro	Simbolo	Unità di misura	Apparecchio di illuminazione			
			Sorgente luminosa			
			Loduri Metallici		LED	
			Tipologia vetro			
			Pi ano	Cur vo	Pi ano	Cur vo
			Modello			
			SGS253	SGS253	SENSO2	SENSO2
			Codice INRIM			
			8258	8259	8260	8261
Fattore di riflessione	r_{90-110}	[1]	0,0156 ± 0,0009	0,0163 ± 0,0010	0,0103 ± 0,0006	0,0106 ± 0,0006
	$r_{110-180}$	[1]	0,133 ± 0,008	0,139 ± 0,008	0,089 ± 0,005	0,088 ± 0,005
	r_{90-180}	[1]	0,148 ± 0,009	0,155 ± 0,009	0,099 ± 0,006	0,099 ± 0,006
Fattore di riflessione equivalente	$r_{e90-110}$	[1]	0,0163 ± 0,0010	0,017 ± 0,001	0,0151 ± 0,0009	0,018 ± 0,001
	$r_{e110-180}$	[1]	0,133 ± 0,008	0,134 ± 0,008	0,118 ± 0,007	0,122 ± 0,007
	$r_{e90-180}$	[1]	0,150 ± 0,009	0,151 ± 0,009	0,133 ± 0,008	0,141 ± 0,008

9.3. Influenza degli edifici

Con i dati misurati disponibili è possibile simulare l'influenza degli edifici, con alcune approssimazioni dovute alle inter-riflessioni.

Se l'edificio è sufficientemente distante dall'impianto il flusso luminoso intercettato dallo stesso è facilmente calcolabile dalla ripartizione dell'intensità luminosa.

Ad esempio un edificio alto 20 m e lungo 40 m alla distanza di 50 m intercetta circa il 10% del flusso luminoso disperso verso l'alto nella zona sferica tra γ_{90} e γ_{110} . Se la sua superficie ha un fattore di riflessione $\rho=0,5$, il 50% di questo flusso viene riflesso e, se la superficie può essere considerata lambertiana, il 50% del flusso riflesso viene diretta verso l'alto, mentre l'altra parte subirà ulteriori riflessioni. La Tabella 16 riassume questo caso, nell'ipotesi di trascurare le riflessioni multiple.

Nel caso di edifici vicini occorre considerare la ripartizione delle luminanze con complessità di calcolo non disponibili al progettista illuminotecnico medio. Una sufficiente stima può essere ottenuta, come nell'esempio precedente, considerando non un edificio isolato, caso peraltro raro, ma una lunga successione di edifici adiacenti. In questa situazione le maggiori approssimazioni si hanno esclusivamente ai limiti iniziali e finali dell'edificio complessivo e l'accuratezza della stima finale, eseguita come precedentemente descritto, adeguata alle aspettative illuminotecniche.

Tabella 16 Esempio di calcolo dell'influenza di un edificio: riduzione percentuale del flusso disperso verso l'alto per la presenza dell'edificio citato come esempio nel testo.

Par a m e t r o	U n i t à d i m i s u r a	A p p a r e c c h i o d i i l l u m i n a z i o n e			
		S o r g e n t e l u m i n o s a			
		I o d u r i M e t a l l i c i		L E D	
		T i p o l o g i a v e t r o			
		P i a n o	C u r v o	P i a n o	C u r v o
		M o d e l l o			
		SGS253	SGS253	SENSO2	SENSO2
		C o d i c e I N R I M			
		8258	8259	8260	8261
Riduzione percentuale	[%]	-0,91	-0,94	-0,95	-1,08

10. CONFRONTO TRA GLI IMPIANTI

Il confronto tra gli impianti modifica sostanzialmente la conclusione di equivalenza tra vetro piano e vetro curvo, evidenziata al §9.2. In questo caso applicando il principio della sovrapposizione degli effetti, occorre considerare il contributo di tutti gli apparecchi installati e quindi anche l'interdistanza tra gli stessi, necessaria per ottenere pari prestazioni normative.

Ai fini del confronto il flusso luminoso disperso verso l'alto può essere utilmente normalizzato per unità di lunghezza dell'impianto (in chilometri) e per il flusso luminoso totale dell'apparecchio (in kilolumen). I risultati, riportati in Tabella 17, evidenziano che le migliori prestazioni si ottengono con gli apparecchi a vetro curvo, anche considerando le incertezze di misura.

Se i valori assoluti sono sensibilmente associati alle caratteristiche dell'area illuminata, il confronto acquista maggior validità e valenza, rendendo meno sensibile l'influenza delle specifiche caratteristiche dell'area illuminata e misurata, peraltro assimilabile a un normale tratto di strada illuminato.

Occorre ancora segnalare due aspetti.

Le tolleranze meccaniche di installazione (in particolare rotazione e inclinazione dell'apparecchio) sono estremamente critiche ai fini dei risultati delle misure e quindi del contributo all'inquinamento luminoso. Questa influenza è evidente considerando i valori del flusso luminoso misurato in laboratorio nella zona sferica compresa tra le direzioni angolari γ_{88} e γ_{92} (Tabella 8) e i grafici di illuminamento sul manto stradale. Il confronto tra i risultati di misura evidenzia una maggior criticità degli apparecchi a vetro piano.

Se si considera l'apparecchio come composto dall'apparecchio stesso e dal palo che lo sorregge risulta, in ogni caso, evidente che il contributo della luce diffusa dal palo incrementa la quota di flusso luminoso disperso direttamente verso l'alto. Questo fenomeno è evidenziato nelle acquisizioni dall'alto ove, oltre una data quota, è il palo l'unico componente che presenta una significativa luminanza, sia con apparecchi a vetro

piano sia con quelli a vetro curvo. Nei risultati di Tabella 14, relativi al contributo della sola sorgente, la differenza di flusso luminoso disperso verso l'alto rispetto ai risultati ottenuti in laboratorio sull'apparecchio di illuminazione corrispondente (Tabella 8) sono dovuti a questo fenomeno.

Tabella 17 Flusso luminoso disperso verso l'alto per unità di lunghezza dell'impianto.

#VALORE!	Simbolo	Unità di misura	Apparecchi di illuminazione							
			Sorgente luminosa							
			Ioduri Metallici				LED			
			Tipologia vetro							
			Piano		Curvo		Piano		Curvo	
			Modello							
			SGS253		SGS253		SENSO2		SENSO2	
			Codice INRIM							
			8258		8259		8260		8261	
			Sorgente	Totale	Sorgente	Totale	Sorgente	Totale	Sorgente	Totale
Flusso luminoso normalizzato rispetto al flusso totale della sorgente in kilolumen per unità di lunghezza dell'impianto	f_{90-110}	[l / km]	21 ± 1	490 ± 20	27 ± 1	460 ± 20	46 ± 2	460 ± 20	108 ± 5	470 ± 20
	$f_{110-180}$	[l / km]	18,0 ± 0,9	4 000 ± 200	26 ± 1	3 600 ± 200	49 ± 2	3 600 ± 200	55 ± 3	3 100 ± 200
	f_{90-180}	[l / km]	39 ± 2	4 500 ± 200	53 ± 3	4 100 ± 200	96 ± 5	4 000 ± 200	162 ± 8	3 600 ± 200

11. CONCLUSIONI

Le misurazioni hanno evidenziato l'elevata complessità del metodo di misura proposto, anche nella fase elaborativa delle misure, ma la sua sostanziale capacità di fornire indicazioni esaustive per la stima dell'inquinamento luminoso, per una sua valutazione quantitativa accurata e per la validazione di modelli semplificati (Vedere relazione AIDI).

I risultati delle misure stabiliscono un sostanziale vantaggio (riduzione del flusso luminoso diretto verso l'alto a parità di prestazioni illuminotecniche) degli apparecchi a vetro curvo rispetto a quelli a vetro piano e delle sorgenti a LED rispetto a quelle a ioduri metallici.

Inoltre si evidenzia l'elevata criticità nell'allineamento degli apparecchi di illuminazione sia nel contenere l'inquinamento luminoso dovuto alla radiazione diretta sia nel raggiungimento delle prestazioni illuminotecniche richieste per l'impianto. Semplici accorgimenti meccanici nel disegno dell'apparecchio potrebbero facilitare l'allineamento senza complicare eccessivamente le procedure di installazione.

La concentrazione della luce emessa nella superficie utile è un altro parametro importante a parità di prestazioni illuminotecniche, in quanto determina l'efficienza del sistema dal punto di vista prestazioni illuminotecniche / potenza elettrica assorbita.

Alte efficienze di questo tipo richiedono la limitazione del flusso luminoso disperso verso il basso su superfici non utili per il raggiungimento delle prestazioni normative (definite solo sul manto stradale e sulle fascie longitudinali adiacenti ai due bordi della carreggiata ed esterne ad essa). Contemporaneamente riducono il contributo per riflessione all'inquinamento luminoso. Richiedono però una maggior attenzione nella scelta da parte del progettista dell'apparecchio e una valutazione delle esigenze e condizioni di illuminazione nelle zone limitrofe all'impianto.

I dati raccolti con le misure dall'alto permettono di calcolare il contributo parziale (radiazione emessa direttamente dagli apparecchi di illuminazione) e globale (considerando la riflessione di tutte le superfici illuminate) dell'impianto in condizioni rurali e con qualche approssimazione in condizioni urbane.

Il fattore spettrale di riflessione dei materiali illuminati riveste un ruolo importante considerando la sostanziale differenza nell'emissione spettrale tra le tipiche sorgenti usate in illuminotecnica.

Per simulare l'influenza spettrale è necessario disporre di una serie di dati foto-radiometrici di tipici materiali di rivestimento degli edifici e del manto stradale. Per quest'ultima voce il comitato CIE TC4-50 ha intrapreso una raccolta di dati sugli asfalti maggiormente utilizzati in ambito europeo.

12. BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Iacomussi, G. Rossi, P. Soardo, F. Serra, Misure in situ di luminanza artificiale del cielo, congresso Nazionale AIDI, Genova, 2004
- [2] P. Soardo, P. Iacomussi, G. Rossi, L. Fellin, Public lighting analysis of environmental and energy conservation, Proceedings of XXV CIE Session World congress 2003, San Diego (USA).
- [3] P. Soardo, G. Rossi, P. Iacomussi, Risparmio energetico e flusso luminoso verso l'alto, LUCE, n° 1, 2003.

- [4] P. Soardo, G. Rossi, P. Iacomussi, L. Fellin, Compatibility between public lighting and astronomical observations, *Lighting Research and Technology*
- [5] L. Fellin, P. Fiorentin, A. Scroccaro, P. Iacomussi, G. Rossi, P. Soardo, Luminous Emission and Artificial Sky Luminance – The case of the North Italian Cities, *Proceedings of 10th European Lighting Conference Lux Europa, 2005, Berlin (Deutschland)*.
- [6] Waldrum J.M., 1972, The calculation of sky haze luminance from street lighting, *Lighting Research and Technology*. 4: 21-26
- [7] CIE 126-1997 Guidelines for minimizing sky glow (under revision)
- [8] UNI 11248:2007, Illuminazione stradale: selezione delle categorie illuminotecniche
- [9] Paola Iacomussi, Giuseppe Rossi, Mario Castellano, "The on site evaluation of performances of road lighting installations", *Proceedings of Lux Europa, Berlin, 19/21-09-2005, pagg. 494-497*.
- [10] IACOMUSSI, P., ROSSI, G., CASTELLANO, M., The Development of a New Mobile Photometric Laboratory, *Proceedings Congreso Internacional de Iluminación 2005.*, 12.05 – 21-05-2005 León.
- [11] UNI EN 13032-1:2005, Luce e illuminazione: Misurazione e presentazione dei dati fotometrici di lampade e apparecchi di illuminazione Parte 1: Misurazione e formato di file.
- [12] UNI 11356:2010, Luce e illuminazione: Caratterizzazione fotometrica degli apparecchi di illuminazione a LED.
- [13] UNI 11142:2004, Luce e illuminazione: Fotometri portatili: Caratteristiche prestazionali.
- [14] C. Gentile, ML Rastello, G. Rossi, P. Soardo, Luminous Flux measurement, *Lighting Research and Technology* 20(4),189-193, (1988).
- [15] CIE 15-2004, Colorimetry, 3rd Edition, CIE Vienna
- [16] UNI EN 13201-1:2004 Luce e illuminazione: Illuminazione stradale: metodi di misurazione delle prestazioni fotometriche
- [17] Paolo Soardo Studio delle caratteristiche di impianti di illuminazione stradale per valutare i consumi energetici e luce dispersa verso l'alto – Rapporto attività svolte da AIDI