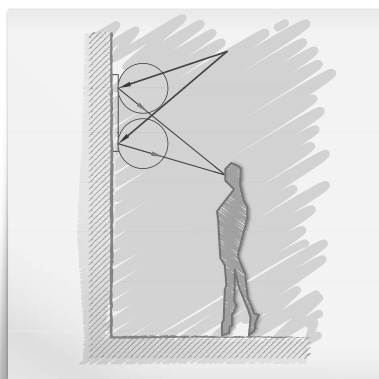


Mario Bonomo – Chiara Bertolaja

ILLUMINAZIONE DEGLI INTERNI

GUIDA ALLA PROGETTAZIONE

CON ESEMPI D'IMPIANTI SVILUPPATI FINO ALLA SCELTA
DEGLI APPARECCHI E ALLA VALUTAZIONE
DEI RELATIVI ONERI D'ESERCIZIO



SOFTWARE INCLUSO

REPERTORIO FOTOGRAFICO, VIDEO DI APPROFONDIMENTO RELATIVO ALLA RESA DEL CONTRASTO
ED AL VOLUME D'OFFESA, TUTORIAL ED ESEMPI DI PROGETTO

Glossario (principali termini tecnico-normativi) e **F.A.Q.** (domande e risposte sui principali argomenti)




GRAFILL

Mario Bonomo – Chiara Bertolaja

ILLUMINAZIONE DEGLI INTERNI – GUIDA ALLA PROGETTAZIONE

ISBN 13 978-88-8207-743-3

EAN 9 788882 077433

Manuali, 168

Prima edizione, maggio 2015

Bonomo, Mario <1926->

Illuminazione degli interni : guida alla progettazione /

Mario Bonomo, Chiara Bertolaja. – Palermo : Grafill, 2015.

(Manuali ; 168)

ISBN 978-88-8207-743-3

1. Spazi interni – Illuminazione – Progettazione.

I. Bertolaja, Chiara <1971->.

621.322 CDD-22 SBN Pal0278314

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Il volume è **disponibile anche in versione eBook** (formato *.pdf) compatibile con **PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader**.

Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con conto corrente postale, bonifico bancario, carta di credito e paypal.

Per i pagamenti con carta di credito e paypal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno smartphone o un tablet il codice QR sottostante.



I lettori di codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Finito di stampare nel mese di maggio 2015

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

INDICE

PREFAZIONE	p.	1
1. LE GRANDEZZE FOTOMETRICHE	"	3
1.1. La luce.....	"	3
1.2. Il flusso luminoso.....	"	4
1.3. L'intensità luminosa.....	"	5
1.4. Il solido fotometrico.....	"	6
1.5. L'illuminamento.....	"	11
1.6. L'illuminamento da sorgenti puntiformi.....	"	12
1.7. L'illuminamento da sorgenti lineari.....	"	13
1.8. La luminanza.....	"	15
1.9. L'illuminamento da grandi superfici luminose.....	"	17
1.10. L'illuminazione naturale.....	"	21
1.11. Il colore.....	"	25
1.12. La resa cromatica.....	"	28
2. LA MISURA DELLA LUCE	"	30
2.1. La misura dell'illuminamento.....	"	30
2.2. La misura del flusso luminoso.....	"	31
2.3. La misura della luminanza.....	"	31
2.4. La misura dell'intensità luminosa.....	"	32
2.5. La misura del "colore" della luce.....	"	33
2.6. Il rilievo dello spettro luminoso.....	"	34
3. SORGENTI LUMINOSE	"	35
3.1. Generazione della luce.....	"	35
3.2. Lampade ad incandescenza.....	"	35
3.3. Lampade ad alogeni.....	"	37
3.4. Lampade LED	"	39
3.5. Lampade OLED	"	43
3.6. Lampade fluorescenti.....	"	45
3.6.1. Lampade fluorescenti compatte.....	"	45
3.6.2. Lampade fluorescenti lineari.....	"	46
3.7. Lampade ad alogenuri.....	"	47
3.8. Lampade al sodio ad alta pressione.....	"	49

4. APPARECCHI D'ILLUMINAZIONE	p.	51
4.1. Apparecchi d'illuminazione.....	"	51
4.2. Protezioni.....	"	51
4.3. Sistemi ottici	"	53
4.3.1. Riflettori	"	53
4.3.2. Rifrattori e lenti.....	"	59
4.3.3. Diffusori	"	60
4.3.4. Schermi	"	60
4.3.5. Filtri.....	"	60
4.4. Sistemi di montaggio	"	60
5. GLI OBIETTIVI DI UNA BUONA ILLUMINAZIONE	"	66
5.1. I livelli di illuminamento	"	66
5.2. L'equilibrio delle luminanze	"	67
5.3. Chiarezza e illuminamenti delle superfici dei locali.....	"	68
5.4. Direzionalità della luce	"	68
5.5. La limitazione dell'abbagliamento	"	72
5.6. Caratteristiche cromatiche della luce.....	"	75
5.7. La modellazione delle persone e degli oggetti tridimensionali	"	76
5.8. Integrazione della luce naturale con la luce artificiale.....	"	79
5.9. Integrazione dell'impianto nell'ambiente.....	"	80
5.10. L'economia degli impianti	"	80
6. ESEMPI DI PROGETTAZIONE	"	81
6.1. Errori ricorrenti	"	81
6.1.1. Gli ambienti residenziali	"	81
6.1.2. Apparecchi a più lampade.....	"	82
6.1.3. Illuminazione diretta e indiretta	"	82
6.2. ESEMPIO 1 <i>L'illuminazione indiretta della navata laterale di una chiesa</i>	"	84
6.3. ESEMPIO 2 <i>L'illuminazione di una specchiera (in un bagno)</i>	"	86
6.4. ESEMPIO 3 <i>L'illuminazione di una sala da pranzo con un mobile libreria</i>	"	88
6.4.1. Illuminazione del tavolo da pranzo	"	88
6.4.2. Illuminazione del mobile libreria.....	"	90
6.5. ESEMPIO 4 <i>L'illuminazione di una camera d'albergo</i>	"	95
6.5.1. Descrizione dell'impianto	"	96
6.5.2. Scenari luminosi.....	"	96
6.5.3. Calcolo degli oneri di energia	"	98
6.6. ESEMPIO 5 <i>L'illuminazione di un ufficio</i>	"	100

6.7. ESEMPIO 6	
<i>L'illuminazione di una biblioteca</i>	p. 103
6.8. ESEMPIO 7	
<i>L'illuminazione di un ristorante</i>	" 105
6.9. ESEMPIO 8	
<i>L'illuminazione della lavagna in un'aula scolastica</i>	" 107
6.10. ESEMPIO 9	
<i>L'illuminazione di una scaffalatura in un negozio</i>	" 108
6.11. ESEMPIO 10	
<i>Integrazione fra luce artificiale e luce naturale</i>	" 111
6.12. La verifica del progetto con i programmi di calcolo.....	" 115
7. CENNI DI ELETTROTECNICA.....	" 126
8. ILLUMINAZIONE D'EMERGENZA.....	" 128
9. REQUISITI ILLUMINOTECNICI PER LE AREE O LE ATTIVITÀ PIÙ COMUNI.....	" 130
10. INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO	" 135
10.1. Note sul software incluso.....	" 135
10.2. Requisiti hardware e software.....	" 135
10.3. Download del software e richiesta della password di attivazione	" 135
10.4. Installazione ed attivazione del software	" 136
11. BIBLIOGRAFIA.....	" 137

PREFAZIONE

La progettazione dell'illuminazione, tanto naturale che artificiale, ha subito profonde modifiche negli ultimi anni soprattutto per le innovazioni tecnologiche intervenute, oltre che per l'importanza sempre crescente del contenimento dei consumi energetici. La luce, in particolare quella prodotta dall'uomo, ha assunto un ruolo nella vita moderna che la vede protagonista in ogni attività umana e spesso ne condiziona il successo, oltre che la sicurezza.

La luce si manifesta sotto diversi aspetti che ne definiscono la qualità:

- l'aspetto funzionale, in moltissimi casi quello prevalente, che riguarda la sua idoneità a consentire l'esecuzione d'una certa attività in piena sicurezza e comfort per gli operatori: il lavoro in un ufficio o in uno stabilimento; la scelta di un oggetto da acquistare in un negozio; l'esecuzione d'uno sport in una palestra; la vista d'uno spettacolo, ecc.;
- l'aspetto formale proprio degli apparecchi d'illuminazione, nell'illuminazione artificiale; e di tutto quanto viene predisposto per massimizzare l'utilizzo della luce diurna, quali oggetti schermanti o filtranti la luce all'esterno delle finestre, vetrate speciali, plafoni, tubi di luce, ecc.;
- l'aspetto formale dello scenario luminoso cui l'illuminazione dà vita, aspetto importante soprattutto quando da esso dipende in buona parte il comportamento del destinatario dell'impianto: ad esempio quello d'un possibile acquirente in un negozio, o di un visitatore in un locale pubblico o privato, ecc.; e da ultimo,
- l'aspetto economico, soprattutto quello dei costi d'esercizio.

Una seria progettazione deve conciliare tutti questi aspetti, con un bilanciamento fra un aspetto e gli altri che deve tener conto delle finalità dell'impianto: ad esempio l'aspetto formale dell'impianto avrà un ruolo importantissimo quando si tratta di inserirlo in un ambiente dove le sorgenti di luce originarie non sono più utilizzabili con le nuove tecnologie, o sono inadeguate alle nuove funzioni dell'ambiente stesso, oppure devono minimizzare il loro impatto sull'ambiente, oppure viceversa quando devono far parte integrante della sua architettura; l'aspetto formale dello scenario luminoso ha specialmente importanza nei locali di soggiorno, di ritrovo e nei locali commerciali dove il gradimento e il comfort del visitatore influenzano in buona parte la sua propensione ad acquistarne i prodotti esposti; e i costi d'esercizio avranno tanto più rilevanza, quanto più lungo sarà il tempo dell'utilizzazione annua dell'impianto oppure più rilevante la loro incidenza sul bilancio di quella Azienda.

Il progetto d'un impianto d'illuminazione deve, da una parte, fissarne gli obiettivi: "quanta luce" sui piani di lavoro o di osservazione, da quante sorgenti e secondo quali direzioni d'impatto; quanta nelle aree circostanti; la sua distribuzione nei vari scenari di osservazione; l'effetto rilievo che si desidera ottenere (su singoli oggetti o negli ambienti), la resa dei colori che devono avere le sorgenti e ogni altro obiettivo del progettista; dall'altra, individuare i mezzi per conseguire detti obiettivi: quanti centri luminosi utilizzare e con quali caratteristiche, dove collocarli;

se e in che misura utilizzare la luce naturale durante il giorno; le modalità di accensione o parzializzazione ed ogni altro particolare dell'impianto.

Nella presente Guida, si cercherà di evitare la consueta trattazione separata di queste due parti, illustrando, per ogni grandezza fotometrica o per ogni nozione introdotta, le sue pratiche applicazioni nel processo progettuale, con esempi ed esercitazioni. Dovrebbe sortirne una trattazione meno arida e di maggior interesse della maggior parte di quelle in circolazione.

La guida si compone di una prima parte che introduce le grandezze fotometriche, ne illustra le applicazioni nel progetto e ne elenca i sistemi di misura.

Una seconda parte tratta la generazione della luce e le sorgenti luminose, in particolare quelle che oggi stanno soppiantando gradualmente tutte le altre: i *LED*, nonché la famiglia più recente di questo tipo di sorgente, gli *OLED*, che proprio attualmente si stanno per affacciare sul mercato con prospettive di notevole interesse.

Una terza parte sarà dedicata agli apparecchi d'illuminazione, ed in particolare alle ottiche.

Una quarta parte riassumerà tutti gli obiettivi che una progettazione si prefigge e che condizionano la qualità d'una installazione; trattazione in buona parte già intravvista nelle parti precedenti e che qui riapparirà in forma organica.

L'ultima parte completerà il quadro dei sistemi di progettazione, trattando in particolare l'illuminazione naturale, e fornirà numerosi esempi di casi ricorrenti d'impianto per le più diffuse applicazioni. Saranno infine forniti alcuni cenni di elettrotecnica elementare, la cui conoscenza è indispensabile per un progettista della luce, data la sua stretta interrelazione con il disegno dell'impianto d'illuminazione.

LE GRANDEZZE FOTOMETRICHE

1.1. La luce

La luce è il prodotto di un fenomeno fisico: le radiazioni emesse da una sorgente luminosa (direttamente: dal sole, da una lampada o indirettamente: da qualsiasi superficie che rifletta o trasmetta le radiazioni a sua volta ricevute); e di un fenomeno fisiologico: la risposta dell'occhio che, investito dalle radiazioni comprese entro una certa gamma di lunghezze d'onda, fornisce agli esseri viventi la visione: la sensazione di quanto ci circonda illuminato. La luce quindi è un fenomeno che prende forma nell'occhio, quando esso è investito da radiazioni emesse da sorgenti luminose (primarie, oppure secondarie, come prima accennato). La risposta dell'occhio avviene quando le radiazioni che lo colpiscono hanno una lunghezza d'onda compresa fra i 380 nano metri (380 milionesimi di millimetro) e 780 nanometri; essa cambia d'intensità fra zero ed un massimo (figura 1.1), quando la lunghezza d'onda cresce fino a circa il centro di detta gamma, per poi calare a zero con il crescere ulteriore della lunghezza d'onda delle radiazioni fino al limite superiore della gamma; e assegna un colore agli oggetti illuminati a seconda della lunghezza d'onda delle radiazioni che essi gli indirizzano: il colore assegnato varia, procedendo in direzione crescente con la lunghezza d'onda, dal violetto, nella gamma fra i 380 e i 435 nm, al blu, dai 435 ai 500 nm, al verde, dai 500 ai 565 nm, al giallo, dai 565 nm ai 600 nm, all'arancione dai 600 ai 630 nm e al rosso, dai 600 ai 780 nm.

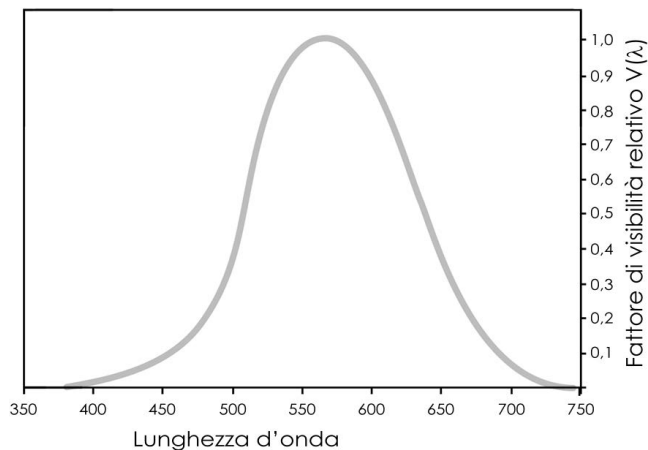


Figura 1.1. Curva di risposta dell'occhio alle radiazioni emesse da una sorgente luminosa

La risposta dell'occhio indicata nella figura 1.1 si riferisce alla visione cosiddetta fotopica, cioè la visione in condizioni di luminosità dell'ambiente abbastanza elevata da assicurare

all'osservatore il pieno riconoscimento dei colori; questa situazione è praticamente la sola che interessa la progettazione della luce negli interni.

In realtà la curva della risposta dell'occhio si sposta verso le lunghezze d'onda più basse, quando la luminosità dell'ambiente è estremamente ridotta (la sua luminanza – grandezza che vedremo più avanti – è inferiore a qualche centesimo di candela al metro quadrato: le condizioni assimilabili a quelle esistenti di notte con luna piena); la visione in quest'ultima situazione prende il nome di visione scotopica, e la risposta massima dell'occhio si sposta dai 555 nm della curva di figura 1.1 ai 510 circa nm. E si è individuata pure una terza situazione, intermedia fra le due viste finora, detta visione mesopica.

1.2. Il flusso luminoso

La luce è quindi il prodotto delle due grandezze con cui sono quantificati i due fenomeni che la originano:

- le radiazioni, con la loro potenza $\varepsilon(\lambda)d\lambda$ espressa in watt (ε epsilon è la potenza, per unità di λ , delle radiazioni comprese entro la gamma infinitesimale $d\lambda$ delle lunghezze d'onda)
- e la risposta dell'occhio $V(\lambda)$, che varia da 0 a 1 secondo la curva di figura 1.1 in funzione di lambda.

Il flusso luminoso prodotto dalla radiazione è quindi:

$$\varepsilon(\lambda) = \varepsilon(\lambda) d\lambda V(\lambda)$$

e il flusso luminoso prodotto da una sorgente che emette un flusso di radiazioni di diverse lunghezze d'onda:

$$\int_{380}^{780} \varepsilon(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

L'espressione che esprime il flusso luminoso Φ emesso da una sorgente comprende in realtà anche un coefficiente $K = 683 \text{ (lm}\cdot\text{W}^{-1}\text{)}$, che serve a raccordare l'espressione sopra riportata all'unità di misura in uso al momento in cui la fotometria venne disciplinata secondo l'attuale assetto: il lumen (abbreviato in lm)¹:

$$\Phi = 683 \int_{380}^{780} \varepsilon(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Il valore di 683 esprime il flusso luminoso prodotto da una sorgente che emettesse una radiazione di un Watt sull'unica lunghezza d'onda di 555 nm dove l'occhio dà la massima risposta, senza alcuna perdita d'energia (sotto le consuete forme tipiche di ogni sorgente quale calore prodotto o irradiato). È evidente che la cifra di 683 ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$), rappresenta un limite d'interesse solo teorico, in quanto una sorgente come sopra ipotizzata, oltre a risultare irrealizzabile per il noto principio che ogni trasformazione energetica comporta inevitabili perdite, non avrebbe alcun valore

¹ Definito come il flusso luminoso emesso nell'angolo solido unitario da una sorgente puntiforme che emette uniformemente un'intensità luminosa di una candela.

di “luce”, per la povertà della sua banda di radiazioni, limitata ad una sola lunghezza d’onda e quindi in grado di riprodurre soltanto quel colore (il giallo), lasciando al buio tutti gli altri colori.

Ogni superficie colorata, infatti, appare tale in quanto riflette, verso gli occhi di chi la osserva, la quota parte delle radiazioni che la investono corrispondente alle lunghezze d’onda dei suoi colori, assorbendo, sotto forma di calore, tutte le altre.

In pratica, le sorgenti luminose oggi disponibili hanno efficienze luminose molto inferiori a quel limite teorico: tali efficienze variano da un minimo di circa 30 lm/watt delle migliori lampade ad incandescenza (quelle con alogeni, a bassissima tensione e con bulbo attivato con Cerio), ad un massimo (per le sorgenti che emettono radiazioni ben distribuite nella gamma visibile) di circa 130 lm/watt delle lampade a *LED* (valore, quest’ultimo, peraltro in costante evoluzione con il procedere delle ricerche).

1.3. L’intensità luminosa

È il flusso $d\Phi$ contenuto in un angolo solido infinitesimale $d\omega$ avente per asse una data direzione:

$$I = d\Phi / d\omega \quad (2)$$

È un vettore il cui insieme mostra la ripartizione nello spazio del flusso luminoso emesso da una sorgente. È espresso in candele, che vengono abbreviate in *cd*. Consideriamo ad esempio una lampada ad alogeni (figura 1.2). Essa emette luce in tutte le direzioni in modo uniforme (prescindendo dalla trascurabile discontinuità in corrispondenza dell’attacco della lampada). Essendo I costante, dall’espressione sopra indicata il suo valore si ricava dal rapporto fra tutto il flusso emesso dalla lampada (Φ) e l’angolo solido corrispondente a tutto lo spazio (4π):

$$I = \Phi / 4\pi \quad (3)$$

Una lampada da 60 W, 1700 lm, emette in tutte le direzioni un’intensità di:

$$1700 / 4\pi = 135 \text{ cd}$$

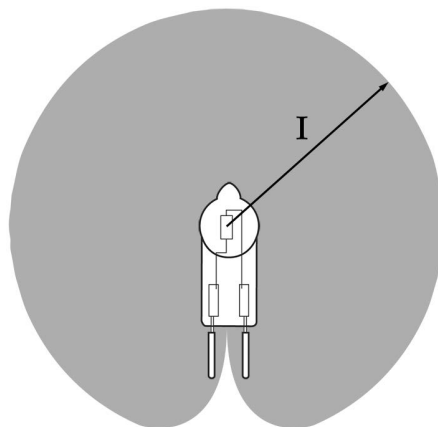


Figura 1.2. Ripartizione nello spazio del flusso luminoso emesso da una sorgente ad alogeni da 12 V con bulbo rivestito di cerio

Un altro esempio è fornito da un *LED* (figura 1.3, lampada che vedremo più avanti) con un'emissione di tipo lambertiano (distribuzione luminosa che contraddistingue anche tutte le superfici diffondenti, come le tinteggiature opache dei muri, il cielo, i prati). In questo caso, che riguarda con buona approssimazione la maggior parte dei *LED* oggi prodotti, l'intensità varia secondo la funzione:

$$I = I_0 \cos \alpha \quad (4)$$

Dalla formula (2) si ottiene²:

$$\Phi = \int_0^{4\pi} I \cdot d\omega = \int_0^{4\pi} I_0 \cos \alpha \cdot d\omega$$

da cui:

$$\Phi = I_0 \pi \quad (5)$$

Se quel *LED* emette un flusso luminoso di 100 lm, l'intensità massima I_0 è di $100/\pi = 33 \text{ cd}$.

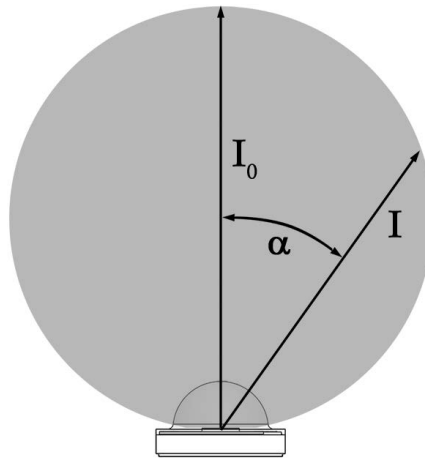
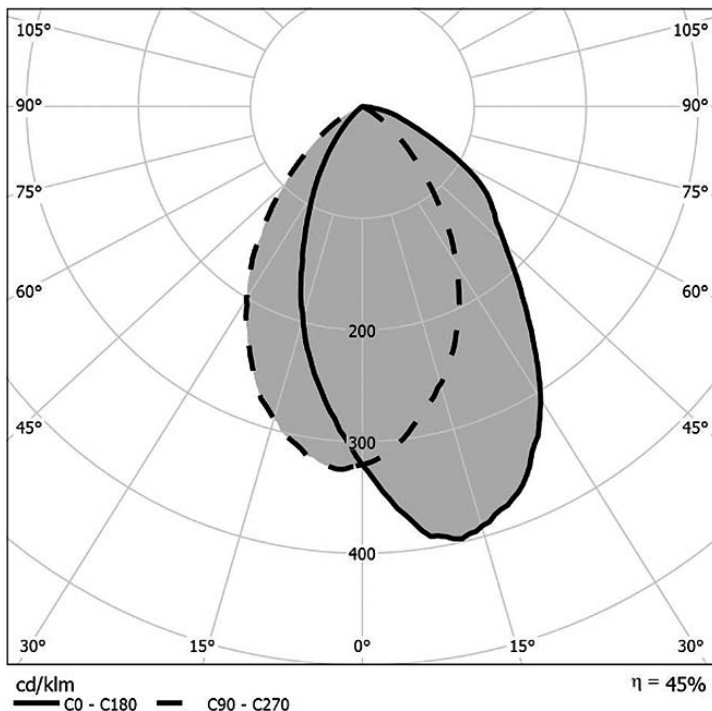


Figura 1.3. La ripartizione “lambertiana” di un *LED* ($I = I_0 \cos \alpha$)

1.4. Il solido fotometrico

Più in generale, la forma con cui il flusso luminoso viene emesso da una sorgente dipende dal tipo di ottica (riflettore, diffusore o lente) di cui la sorgente viene dotata. La forma viene denominata: indicatrice d'emissione – o più semplicemente solido fotometrico – e viene indicata in forma grafica o tabellare (vedi figura 1.4). Essa viene ricavata in laboratorio per mezzo di un goniometro, che verrà illustrato nel seguito.

² Cfr. M. Bonomo, *Illuminazione d'interni*, Maggioli Editore, pp. 18 e 19 [1].



Gamma	C 0°	C 30°	C 60°	C 90°	C 120°	C 150°	C 180°	C 210°	C 240°	C 270°	C 300°	C 330°	C 360°
0.0°	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321	321
5.0°	361	348	326	308	304	288	281	288	304	324	326	348	361
10.0°	390	363	321	285	281	255	244	255	281	312	321	363	390
15.0°	394	361	306	261	251	218	203	218	251	293	306	361	394
20.0°	380	346	286	235	220	180	159	180	220	271	286	346	380
25.0°	354	328	260	203	186	140	119	140	186	239	260	328	354
30.0°	317	299	231	170	153	104	86	104	153	206	231	299	317
35.0°	270	254	193	134	114	72	57	72	114	172	193	254	270
40.0°	223	209	157	97	81	47	34	47	81	134	157	209	223
45.0°	183	161	117	66	54	28	17	28	54	97	117	161	183
50.0°	155	119	83	43	34	14	6.21	14	34	68	83	119	155
55.0°	136	86	55	24	18	4.14	1.38	4.14	18	44	55	86	136
60.0°	104	59	33	10	7.59	0.69	0.69	0.69	7.59	26	33	59	104
65.0°	70	38	16	2.76	2.07	0.00	0.00	0.00	2.07	12	16	38	70
70.0°	46	21	6.90	0.69	0.69	0.00	0.00	0.00	0.69	4.83	6.90	21	46
75.0°	32	13	2.76	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.07	2.76	13	32
80.0°	18	7.59	0.69	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	0.69	7.59	18	
85.0°	4.14	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	0.00	1.38	4.14	
90.0°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Valori in cd/klm

Figura 1.4. Rappresentazione delle intensità luminose emesse da una sorgente di luce, in cd/klm, in forma grafica polare ed in formato tabellare

In figura 1.5 sono illustrati i piani passanti per l'asse ottico dell'apparecchio in cui è suddiviso il solido, chiamati piani C; per ciascun piano sono riportate le intensità in funzione dell'angolo gamma, a partire dalla verticale verso il basso. Il piano C0 è quello generalmente perpendicolare all'asse minore dell'apparecchio. La rappresentazione grafica avviene in forma polare o cartesiana.

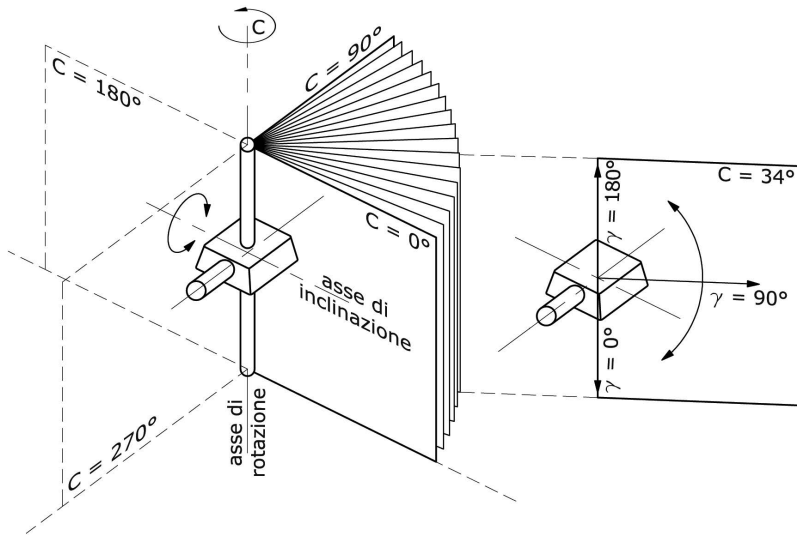


Figura 1.5. Le coordinate $C\gamma$ della rappresentazione di un solido fotometrico

Nella forma polare (figura 1.6), l'intensità luminosa emessa dall'apparecchio è rappresentata da un vettore il cui valore è indicato dai cerchi che hanno per centro l'origine del vettore; e la sua direzione nel piano del diagramma è dato dalla sua inclinazione rispetto la verticale, l'angolo γ della figura.

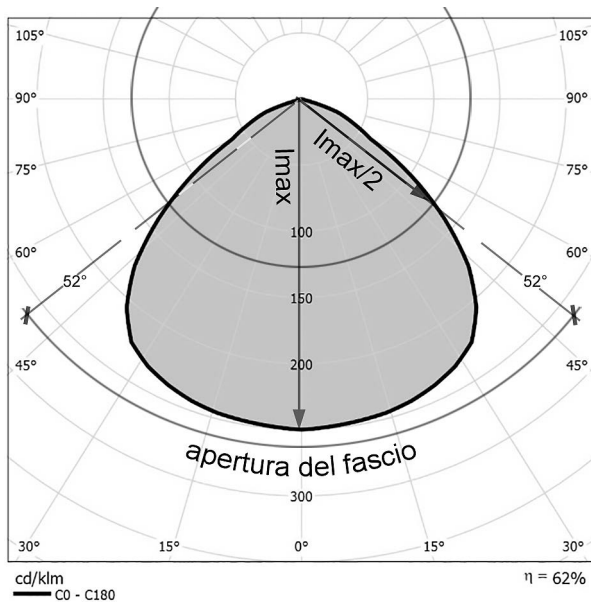


Figura 1.6. Diagramma polare del solido fotometrico di un apparecchio avente per sorgente un LED dotato di una lente con la quale l'apertura del fascio è 104°

Nella rappresentazione cartesiana (figura 1.7), l'intensità è data dall'asse y, mentre l'angolo γ è riportato nelle ascisse. Se il solido fotometrico è identico su tutti i piani passanti per il suo asse ottico, è sufficiente a rappresentarlo un solo diagramma: è il caso di un solido a simmetria rotazionale; quando invece la distribuzione delle intensità cambia da piano a piano, sono necessarie a rappresentarlo più diagrammi, o meglio si fa uso della rappresentazione tabellare (figura 1.4).

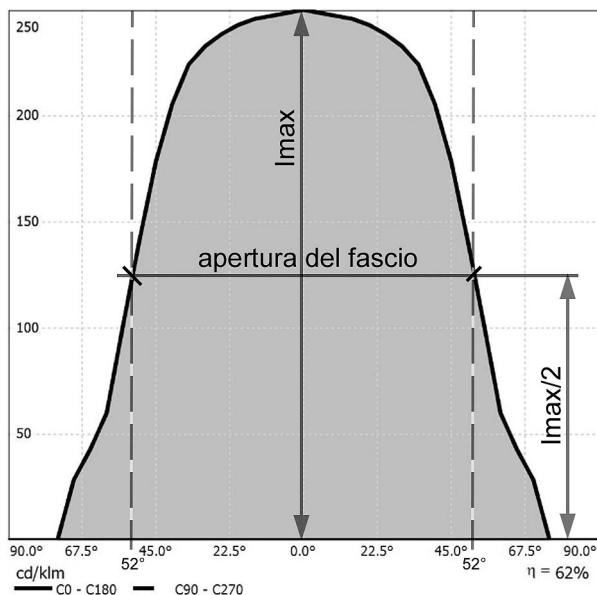


Figura 1.7. Diagramma cartesiano dello stesso solido fotometrico di figura 1.6

L'intensità luminosa è espressa normalmente in candele ogni 1000 lumen emessi dall'apparecchio; questo allo scopo di poter utilizzare lo stesso diagramma per centri luminosi che hanno la stessa ottica e lampade delle stesse dimensioni, ma emissione luminosa diversa. Ad esempio, apparecchi con lo stesso tipo di *LED* e la stessa ottica, ma alimentati con diversa corrente elettrica; oppure lampade fluorescenti tubolari con lo stesso diametro (ad esempio, di 16 mm, che è il tipo attualmente in uso), ma differente lunghezza e quindi differente emissione luminosa (per queste lampade, il riflettore opera soltanto in direzione normale all'asse del tubo).

Nel caso delle figure 1.6 e 1.7, le intensità luminose in candele si ricavano moltiplicando i valori del grafico per il flusso del *LED* in migliaia di lumen: se quel *LED*, quando funziona senza ottica, emette 120 lm con la prevista corrente di 350 mA, l'intensità massima emessa risulterà di $250 \times 0,12 = 30$ cd. Nei diagrammi delle due figure, è indicata una sola curva, che rappresenta l'intero solido fotometrico; si tratta infatti di un solido a simmetria rotazionale, così chiamato quando l'emissione luminosa ha la stessa forma in tutti i piani passanti per l'asse ottico dell'apparecchio.

Nelle figure è indicata anche l'apertura del fascio luminoso, che è l'angolo compreso fra le due intensità pari alla metà della massima; questo angolo è chiamato anche apertura del fascio al 50% (con riferimento al valore delle due intensità che ne sono i limiti), per distinguerlo dall'apertura al 10%, usata talvolta per indicare l'ampiezza entro cui viene emessa la quasi totalità del flusso luminoso. L'ampiezza al 50% è molto utile per la progettazione, come vedremo.

Dalla curva fotometrica, in particolare per gli apparecchi a simmetria rotazionale, è possibile ricavare il flusso emesso dall'apparecchio, per confrontarlo con quello proprio della sorgente "nuda", e conoscere il rendimento dell'apparecchio:

$$\eta = \frac{\text{Flusso emesso dall'apparecchio}}{\text{Flusso emesso dalla lampada "nuda"}} \quad (6)$$

Calcoliamo, ad esempio, il flusso emesso dall'apparecchio di figura 1.6, suddividendo il diagramma fotometrico in tanti spicchi coassiali di ampiezza di 15° (figura 1.8).

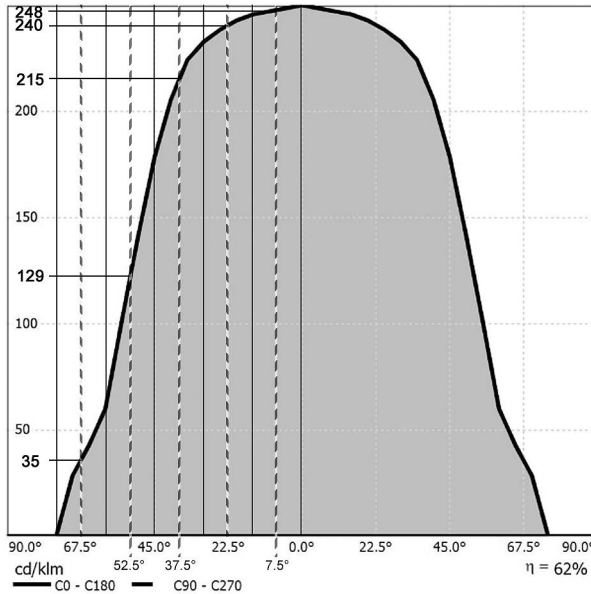


Figura 1.8. Calcolo del flusso emesso dall'apparecchio di figura 1.6; il LED nudo ha un flusso luminoso di 70 lm. Dal calcolo risulta che il flusso luminoso emesso dall'apparecchio (LED+lente) è 45 lm

La formula (2) $I = d\Phi/d\omega$, risolta rispetto a flusso Φ e calcolata per sommatoria, diventa:

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_0^{4\pi} I \cdot d\omega \approx \sum I_i \cdot 2\pi (\cos\gamma_{(i-\Delta i)} - \cos\gamma_{(i+\Delta i)}) = \\ &= 2\pi \cdot 0,07 [I_{7,5^\circ} (\cos 0^\circ - \cos 15^\circ) + I_{22,5^\circ} (\cos 15^\circ - \cos 30^\circ) + I_{37,5^\circ} (\cos 30^\circ - \cos 45^\circ) \\ &\quad + I_{52,5^\circ} (\cos 45^\circ - \cos 60^\circ) + I_{67,5^\circ} (\cos 60^\circ - \cos 75^\circ)] = \\ &= 2\pi \cdot 0,07 [248 (\cos 0^\circ - \cos 15^\circ) + 240 (\cos 15^\circ - \cos 30^\circ) + 215 (\cos 30^\circ - \cos 45^\circ) \\ &\quad + 129 (\cos 45^\circ - \cos 60^\circ) + 35 (\cos 60^\circ - \cos 75^\circ)] = 45 \text{ lm} \end{aligned}$$

Nella formula il valore 0,07 è il flusso in klm emesso dal LED, che va moltiplicato per le intensità relative I_i (cd/klm) per ottenere le intensità in candele.