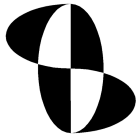


DISPENSE DI

PROGETTAZIONE OTTICA
PROGETTAZIONE DI STRUMENTI OTTICI

Cap.9 – FOTOMETRIA E SPETTROMETRIA

Ing. Fabrizio Liberati



Cap.9 FOTOMETRIA E SPETTROMETRIA

9.1 Misura della luce

La luce è la porzione dello spettro elettromagnetico cui è sensibile l'occhio umano. Pertanto si dovrebbe parlare propriamente di luce soltanto per la radiazione compresa nell'intervallo tra circa 380 e 770nm. In realtà, da un punto di vista tecnico, consideriamo alla stessa stregua bande anche parzialmente o completamente esterne a quella visibile in quanto tali radiazioni possono comunque essere sfruttate per la formazione di immagine prodotta su sensori sensibili a tali lunghezze d'onda, e quindi parliamo impropriamente di "luce ultravioletta" o "luce infrarossa".

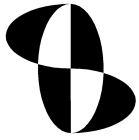
La misura della luce è per tutti gli aspetti analoga alla misura di energia radiante e le definizioni della fisica classica riguardanti la *radiometria* (come ad esempio *intensità radiante*, *radianza*, *irradianza*) sono trasferibili alla *fotometria* (rispettivamente *intensità luminosa*, *brillanza* o *luminanza*, *illuminazione* o *illuminanza*) con la sola accortezza di considerare l'efficacia luminosa, che in termini matematici rappresenta il peso spettrale da assegnare alla radiazione; infatti la sensibilità dell'occhio umano alla radiazione luminosa dipende della lunghezza d'onda. Purtroppo però nei secoli si sono sviluppati sistemi di misura con approcci diversi, per cui le definizioni risultano in qualche modo in soprannumero rispetto a quelle che sarebbero necessarie, e le unità di misura riguardanti la stessa quantità fisica sono molteplici anche a causa delle origini culturali diverse (si pensi soltanto ai sistemi metrici rispetto a quelli anglosassoni). Per evitare di generare ulteriore confusione, anche in vista della utilità di questo corso, preferiamo considerare in questa sede soprattutto gli aspetti qualitativi della luce, rimandando ad altri testi per gli aspetti di quantizzazione.

Curva fotopica, efficacia luminosa

Come detto, l'occhio umano è sensibile alla parte dello spettro elettromagnetico che va da 380 e 770nm circa. All'interno di questa banda la sensibilità non è costante, ma varia in modo consistente, addirittura di ordini di grandezza, se si considerano le code di sensibilità prossime ai valori estremi. La lunghezza d'onda a cui l'occhio umano è maggiormente sensibile è 555nm. Per definizione 1watt di radiazione a questa lunghezza d'onda equivale a 683 lumen; 1watt di radiazione a lunghezze d'onda diverse vale un numero inferiore di lumen. Il lumen è la potenza luminosa efficace: in altre parole uno numero di lumen, seppure a diverse lunghezze d'onda, ovvero di diverso colore, e quindi relativo a un numero diverso di watt, dà ad un osservatore medio la stessa sensazione di intensità luminosa.

Questo comportamento è normalizzato nella curva fotopica che rappresenta quindi la diversa sensibilità dell'occhio umano medio.

Per una generica sorgente che emette uno spettro complesso $P(\lambda)$, il flusso luminoso emesso, essendo $V(\lambda)$ la risposta di sensibilità dell'occhio, vale:



OPTO SERVICE srl

$$F = \int_{380nm}^{770nm} P(\lambda) * V(\lambda) * d\lambda [=] lumens$$

Queste considerazioni sono valide in condizione di luminosità diurna. In condizioni di bassissima luminosità, o luminosità scotopica, e cioè per illuminazioni di intensità inferiori a 0.01Lux, la massima sensibilità si sposta attorno a 507nm ed occorre considerare una diversa curva di sensibilità, simile alla precedente ma spostata di circa 48nm verso lunghezze d'onda più corte. Questo è dovuto al fatto che la rivelazione della luce in questo caso avviene attraverso i bastoncelli, che sono i ricettori della retina umana più sensibili; in condizioni di maggiore illuminamento vengono utilizzati i coni che consentono una migliore risoluzione. Oltre all'intensità luminosa, in base allo spettro della radiazione ricevuta l'occhio umano è in grado di distinguere il colore, per cui si è resa necessaria la costituzione di una disciplina apposita.

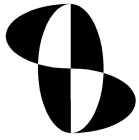
9.1 Colorimetria

Per cercare di rendere numericamente il colore sono stati proposti vari sistemi, ciascuno con i vantaggi e i limiti che comporta il cercare di quantificare una sensazione psicofisica. Le condizioni ed il contesto entro cui l'osservazione avviene, la natura e lo spettro di emissione del campo circostante l'oggetto, la scena osservata precedentemente possono alterare la sensazione di colore provata. Pertanto le rilevazioni atte a stabilire i parametri di misura e caratterizzazione sono effettuate con estrema attenzione, su base statistica e su soggetti in condizioni ben definite.

Come detto la sensazione di colore dipende dalla distribuzione spettrale della radiazione percepita entro la banda di sensibilità dell'occhio. La relazione spettro-colore non è però di tipo biunivoca: diverse distribuzioni spettrali possono dar luogo alla stessa sensazione di colore.

Già i primi studi nell'ambito della colorimetria hanno portato a stabilire che nell'osservazione di un oggetto l'occhio distingue tre caratteristiche indipendenti l'una dall'altra: la *luminosità*, la *tinta* e la *saturatione*.

- La luminosità esprime la sensazione di *intensità* di luce percepita. Facendo ricorso alla risposta di sensibilità dell'occhio $V(\lambda)$, la fotometria è in grado di disciplinare tale grandezza "monodimensionale": i sistemi di presentazione di immagine in bianco e nero (fotografia, televisori) riproducono questa sensazione con opportuni filtri che materializzano più o meno accuratamente la curva fotopica. Se anziché una sorgente luminosa stiamo osservando un oggetto illuminato, la sua luminosità dipende oltre che dalla quantità di luce che lo investe anche dalle caratteristiche, sue e della sua superficie esterna, di riflettività, assorbimento o trasparenza.
- La tinta indica il *tipo* di colore, così come culturalmente siamo abituati a definirlo (blu, rosso, giallo....). In realtà ad ogni lunghezza d'onda corrisponde una tinta ed è



quindi definibile un colore, ma esiste un intervallo spettrale all'interno del quale non si riesce a percepire alcuna variazione cromatica.

- La saturazione indica la *purezza* della tinta, ovvero la assenza o la presenza più o meno accentuata del bianco. I colori meno saturi, detti pastello, sono quelli in cui il contenuto di bianco è più elevato.

A differenza della luminosità, la tinta e la saturazione rivestono carattere qualitativo, nel senso che non dipendono dall'intensità della luce, ma dalla sua composizione spettrale. Anche in questo caso i metodi di misura sono diversi e spesso si fa facilmente confusione, anche perché in qualche caso si continuano ad utilizzare unità di misura e riferimenti che gli organismi internazionali di unificazione hanno revisionato e superato. I sistemi più diffusi sono si basano sulle coordinate cromatiche, cioè su un rapporto relativo tra varie zone spettrali che costituiscono la radiazione percepita.

Coordinate cromatiche

Dalla opportuna combinazione o somma di una terna di colori primari (normalmente blu, verde e rosso) si può ottenere qualsiasi colore. Su questa assunzione si basa la colorimetria Tristimulus ed i sistemi di misura del colore mediante coordinate cromatiche.

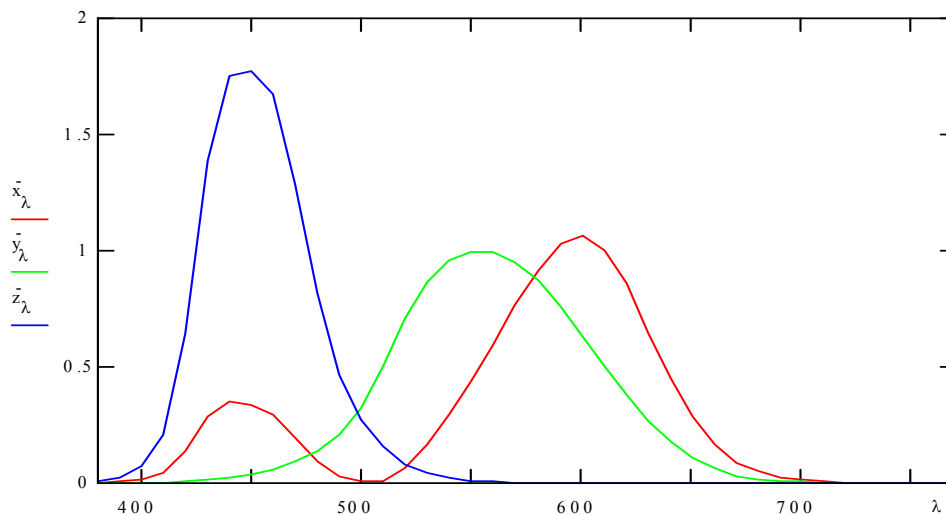
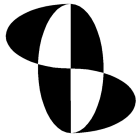


figura 9.1

Delle infinite possibili terne di colori primari, la CEI (Commission International de l'Eclairage) nel 1931 ha scelto le tre distribuzioni $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ e $z(\lambda)$ mostrate in figura 9.1 che, pur non corrispondendo fisicamente a delle sorgenti reali, godono di diverse proprietà fisiche e matematiche. Alcune di queste sono le seguenti:

- la curva $y(\lambda)$ che rappresenta il verde è la curva di sensibilità fotopica dell'occhio medio;
- per ciascuna curva l'area della zona sottesa ha lo stesso valore;



OPTO SERVICE srl

- tutti i colori esistenti possono ottenersi mediante combinazioni lineari con coefficienti positivi degli integrali degli spettri di emissione pesati coi i colori primari definiti;
- il colore bianco ha tre componenti uguali tra loro.

Per poter ottenere tutte le proprietà appena dette, i colori primari sono in realtà sovrasaturi, e non rappresentano perciò dei colori reali.

Ciascun colore esistente il cui spettro è dato da $P(\lambda)$ può essere riprodotto, per quanto riguarda la sensazione percepita, dalla somma dei tre colori primari nelle quantità X, Y e Z, essendo queste ottenute da:

$$X = \int_{380nm}^{770nm} P(\lambda) * \bar{x}(\lambda) * d\lambda$$

$$Y = \int_{380nm}^{770nm} P(\lambda) * \bar{y}(\lambda) * d\lambda$$

$$Z = \int_{380nm}^{770nm} P(\lambda) * \bar{z}(\lambda) * d\lambda$$

Come detto, per come è ottenuta la componente Y equivale alla luminanza dell'oggetto in esame.

Dal momento che per definire il colore qualitativamente interessa solo il valore relativo delle componenti X, Y e Z, si possono definire le quantità x, y e z, detti coefficienti tricromatici, come:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

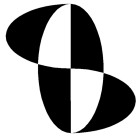
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Per come sono definiti, solo due coefficienti sono necessari per la definizione del colore, in quanto evidentemente vale la relazione:

$$x + y + z = 1$$

Pertanto x e y, dette anche *coordinate cromatiche*, individuano univocamente un colore come tinta e saturazione, ed insieme ad Y forniscono anche la luminosità definendo la sensazione cromatica in modo completo.



La figura 9.2 rappresenta il diagramma di cromaticità secondo l'osservatore standard CEI 1931. Il punto centrale (C, $x = 0.333$, $y = 0.333$) rappresenta il colore della luce diurna. La parte curva del diagramma corrisponde ai colori saturi o puri, generati da sorgenti monocromatiche, mentre all'interno sono riportati tutti i colori percepibili.

Una proprietà di questo diagramma è che un colore può essere ottenuto mediante miscelazione di due colori la cui congiungente i rispettivi punti rappresentativi passi per le coordinate cromatiche del colore dato; le percentuali relative dei componenti sono inversamente proporzionali alla distanza dal punto dato.

Nell'effettuare questa operazione, quando si sceglie come primo componente il punto centrale C e come secondo il punto che intercetta il prolungamento della congiungente da C alla curva esterna del diagramma attraverso il punto che rappresenta il colore dato, si ottiene quella che si chiama lunghezza d'onda *dominante*. La purezza spettrale del colore è pari al rapporto tra la lunghezza del segmento punto-dominante e quella tra dominante-illuminante (in questo caso C).

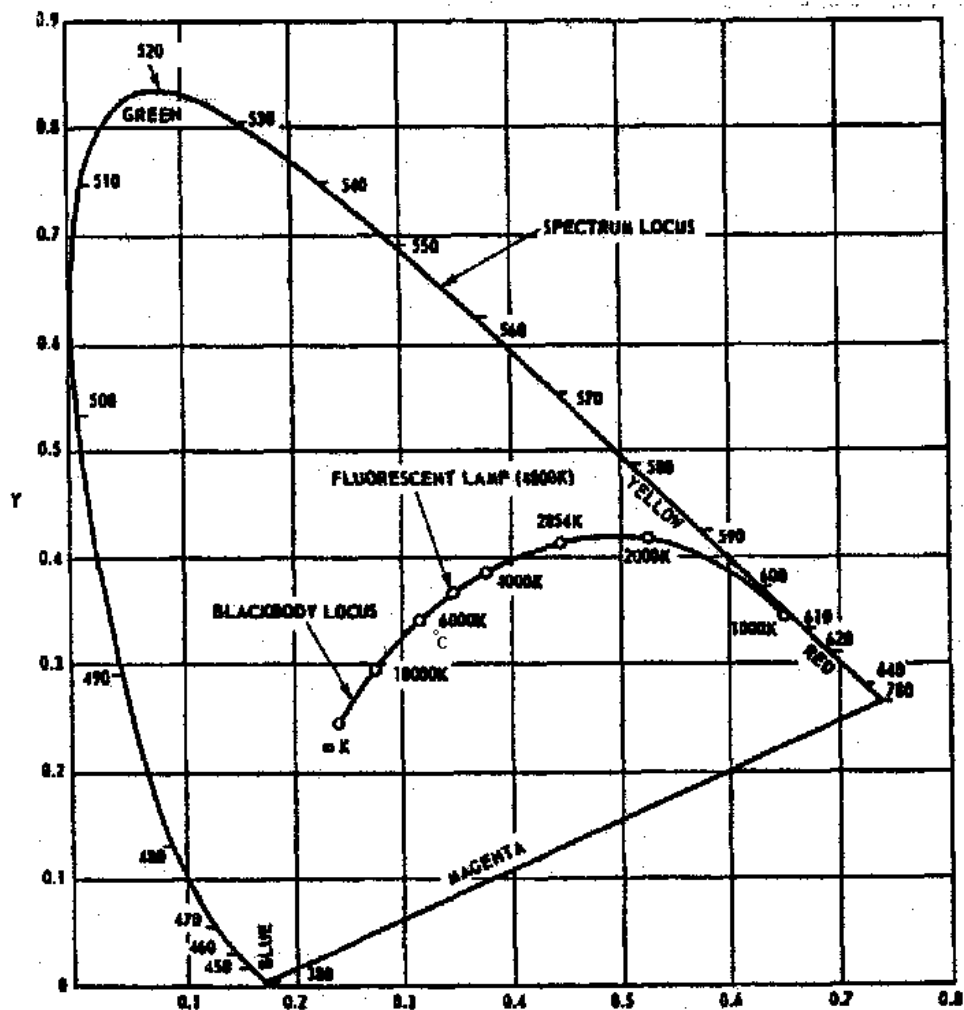
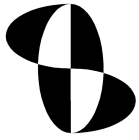


figura 9.2



OPTO SERVICE srl

La parte di diagramma limitata tra C e il segmento che unisce gli estremi dei colori monocromatici percepibili (380 e 770nm) individua l'insieme di colori noti col nome di porpore. Per questi non vale la proprietà precedente, ma volendo applicare anche a questi il concetto di dominante, si può estendere la congiungente i due punti nella direzione opposta a C, intercettando la curva delle sorgenti monocromatiche in quella che stavolta si definisce lunghezza d'onda *complementare*: sommando questo colore a quello dato in proporzioni ancora una volta date dalle lunghezze dei segmenti, si può ottenere il colore C. In questo modo tutti i colori si possono trattare in termini matematici come somme, sottrazioni o combinazioni lineari di componenti. Queste proprietà sono state sfruttate per la riproduzione di colori a partire da tre colori fondamentali o primari additivi ad esempio nei cinescopi a colori. Successive revisioni da parte della CIE del diagramma di cromaticità (1960, coordinate u,v e 1976, coordinate u',v') hanno considerato altre condizioni, come ad esempio un diverso campo di vista osservato, e messo in rilievo proprietà diverse, come la soglia di distinguibilità del colore o altro, ma concettualmente si basano sugli stessi principi.