

03. SORGENTI DI LUCE: FONDAMENTI, DISTRIBUZIONE DI POTENZA RELATIVA, TEMPERATURA DI COLORE, EFFICIENZA, RESA CROMATICA (Ra o IRC o CRI), FORMA DELLA LUCE, LUCE NATURALE

SORGENTE DI LUCE → Una sorgente di luce è un oggetto in grado di emettere un flusso luminoso. Ciò è possibile perché un'altra forma di energia viene trasformata in energia luminosa. La luce prodotta dalle sorgenti si distingue in due categorie fondamentali: la luce naturale (che può provenire direttamente dal sole o essere luce diffusa dall'atmosfera terrestre) e la luce artificiale (luce prodotta dagli apparecchi di illuminazione). Un apparecchio di illuminazione è il dispositivo fisico che contiene la sorgente (lampada) proteggendola e proteggendo da essa le persone; controlla inoltre la distribuzione della luce. La variazione della luce naturale cambia molto anche il modo in cui l'interno viene percepito. I cosiddetti 'tubi a neon' in realtà non contengono neon, in quanto gas raro e costoso, ma vapori di mercurio, che costano molto meno ma sono tremendamente inquinanti e nocivi (il mercurio si accumula nell'organismo umano e non può essere eliminato).

LO SPETTRO → L'energia emessa da una sorgente di luce viene espressa tramite la grandezza radiometrica nota come uscita radiante spettrale M_e . Questa fornisce l'informazione su quanta energia viene emessa (area sottesa allo spettro) e su quali lunghezze d'onda (forma dello spettro: colore).

Come viene descritto lo spettro della luce che esce da una sorgente di luce?

(Slide 3) Esempio di uno spettro emesso da una sorgente di luce commerciale e la grandezza che viene utilizzata è l'uscita radiante spettrale (cioè l'opposto dell'irradianza). Lo spettro rappresenta le varie onde monocromatiche che compongono quella radiazione luminosa e ci dice anche in base all'altezza quanta energia c'è per quella radiazione luminosa. La forma dello spettro è ciò che determina il colore.

DISTRIBUZIONE DI POTENZA RELATIVA → Esiste un altro tipo di informazione che è ottenuta dallo spettro: distribuzione di potenza relativa; relativa sta a indicare che quello spettro è normalizzato rispetto al valore dello spettro stesso in corrispondenza di 560 nm. È un'operazione di normalizzazione che consiste nel dividere la curva per il suo valore in corrispondenza di 560 nm, e poi moltiplicarlo per 100. Lo spettro infatti è utile in particolare se è confrontabile con altri spettri (per esempio confrontare gli spettri di due differenti sorgenti di luce). Tuttavia se si vuol confrontare lo spettro emesso da sorgenti artificiali con lo spettro della luce naturale che proviene dalla finestra, bisogna tener presente una differenza fondamentale: essi hanno un'energia associata molto diversa (se li volessi confrontare avrei lo spettro della sorgente di luce artificiale minimizzato in basso e quello della luce naturale significativamente più alto).

L'operazione di normalizzazione non tiene conto dell'energia e mantiene solo la forma dello spettro (l'informazione cromatica).

Perché dividere l'uscita radiante spettrale per il suo valore in corrispondenza di 560 nm? Perché vicino a questa lunghezza d'onda c'è il massimo della sensibilità fotopica umana (in realtà quel massimo è a 555 nm, per convenzione si è scelto 560 nm).

- La distribuzione di potenza relativa definisce le caratteristiche spettrali (colore della luce emessa) di una sorgente. La distribuzione di potenza relativa è definita come il rapporto tra l'uscita radiante spettrale e la stessa per il valore di 560 nm.

La curva spettrale (S_e) mostra come l'energia viene emessa per le varie lunghezze d'onda, in percentuale, rispetto alla lunghezza d'onda fondamentale 560 nm. Ciò perché circa a 560 nm l'osservatore umano ha il massimo dell'efficacia visiva spettrale.

(slide6) Sono rappresentate due distribuzioni di potenza relativa (S_e) per poterle confrontare. Entrambe passano per il punto (560nm; 100).

Si confrontano lo spettro della lampadina a incandescenza di Tungsteno con lo spettro della luce naturale in una giornata di cielo sereno (somma luce diretta del sole + luce diffusa del cielo) → Sono due luci completamente diverse perché mentre la luce del sole è più calda, quella del cielo è più fredda; ma entrambe sono luci bianche. Sommate danno quello spettro, che è approssimativamente distribuito in maniera quasi uniforme su tutte le lunghezze d'onda visibili: cioè contiene più o meno nella stessa quantità tutte le onde monocromatiche, ovvero tutti i colori (concetto fondamentale di luce bianca come somma di tutti i colori). I due spettri sono confrontabili sebbene lo spettro della luce naturale abbia probabilmente 4 ordini di grandezza in più di energia. (Se anziché confrontare gli spettri normalizzati, cioè le potenze relative,

avessi confrontato le distribuzioni di potenza spettrale la curva riferita alla luce naturale sarebbe stata molto più in alto).

Il concetto di distribuzione di potenza relativa è molto utilizzato per rappresentare le colorazioni spettrali sui cataloghi delle sorgenti di luce. È un dato che non contiene informazioni sull'energia ma attraverso la forma dà informazioni sulla cromaticità. ALTRI TIPOLOGIE DI NORMALIZZAZIONI:

- Alcune sorgenti hanno un valore $M_e(560) = 0$ o insignificante. In questi casi si utilizzano normalizzazioni diverse:

Lo spettro della lampada a vapore di sodio a bassa pressione in corrispondenza di 560 nm è zero. Se andassi ad applicare la stessa normalizzazione per una lampada del genere avrei un numero diviso zero (problema!). Quindi per alcune sorgenti di luce si usa un tipo di normalizzazione diversa e tra queste sorgenti di luce ci sono ad esempio i led che hanno uno spettro molto irregolare, e alcuni led colorati possono anche avere valore zero in corrispondenza di 560 nm. Quindi anziché dividere l'uscita radiante spettrale per il suo valore in corrispondenza di 560 nm, si divide il flusso radiante spettrale in corrispondenza del suo valore di picco (il valore di picco è il punto più alto della curva e la sua lunghezza d'onda è quella in corrispondenza di cui il picco si verifica).

Questo tipo di normalizzazione porta ad una curva variabile tra 0 e 1 (1 sarà in corrispondenza del valore di picco perché in corrispondenza di questo valore ho diviso per se stesso ottenendo 1). Questo si applica molto nei led.

- Per le sorgenti a scarica nei gas si descrive la potenza radiante spettrale emessa per produrre un flusso luminoso di 1 lm. Si divide il flusso radiante spettrale per il flusso luminoso. Quindi si mischiano grandezze radiometriche e fotometriche).

- Oppure la stessa cosa moltiplicata per 1000: sarebbe la potenza radiante spettrale emessa per produrre un flusso luminoso di Klm (chilo lm)

La distribuzione di potenza relativa è un valore adimensionale compreso tra 0 e 1; adimensionale poiché frutto di una normalizzazione.

IL CORPO NERO → Il fisico tedesco Planck ha immaginato un corpo ideale della fisica (il corpo nero) che è in grado di assorbire tutte le radiazioni.

Il corpo nero è un oggetto in grado di assorbire luce di tutte le lunghezze d'onda. Se riscaldato emette luce con uno spettro che è funzione della temperatura.

In fisica vale la legge che nulla si crea, nulla si distrugge ma tutto si trasforma. Difatti tutta questa energia elettromagnetica si trasforma in calore: il corpo nero si scalda. Esso ha un comportamento duale: se anziché mandargli energia radiante è scaldato, emette esso stesso energia radiante. Quindi il corpo nero se scaldato emette esso stesso radiazioni elettromagnetiche.

1. Più scaldo il corpo nero più lo spettro è alto; più lo spettro è alto più l'area sottesa è maggiore (più energia radiante).

2. All'aumentare della temperatura del corpo nero il picco si sposta verso le lunghezze d'onda più corte (va dal rosso al blu).

Questa cosa si vede meglio se anziché considerare lo spettro assoluto, cioè l'uscita radiante spettrale del corpo nero, considero la sua distribuzione di potenza relativa, cioè la versione normalizzata. Il corpo nero a mano a mano che si scalda è come se fosse una linea che gira in senso orario.

Per le corte lunghezze d'onda ho il violetto, il blu, il ciano, il verde, giallo, arancio, ambra rosso.

Per una bassa temperatura di colore il corpo nero di blu e di verde quasi non ne emette. In termini di radiazioni emette tutto giallo-rosso.

In corrispondenza di 5000-6000K è quasi una linea orizzontale su tutto lo spettro visibile; contiene tutti i colori nella stessa quantità. Non è un caso che la luce naturale a cui siamo abituati all'esterno (che noi immaginiamo come luce più bianca in assoluto) sia sempre luce che si muove fra i 5000-7000K.

In corrispondenza di 10.000K ho un'enorme emissione nella zona del blu-violetto-ciano-verde nel giallo diminuisce progressivamente sino al rosso. Quindi ho una luce che è molto fredda (tipo la luce del cielo).

Per temperature varianti tra 2000-20.000°K il corpo nero emette luce con colori dominanti che passano dal rosso, giallo, bianco, violetto, azzurro.

Una luce più calda (rossastra) corrisponde quindi ad un corpo nero più freddo.

TEMPERATURA DI COLORE → La temperatura del corpo nero che emette uno spettro simile a quello di una radiazione luminosa viene anche detta temperatura di colore correlata (CCT) della radiazione luminosa. Tale temperatura espressa in gradi kelvin non ha nessuna relazione con la temperatura reale della sorgente che emette luce. NB: la temperatura colore è una caratteristica delle sole sorgenti di luce bianca e non è definita per le sorgenti di luce colorate.

LUOGO PLANCKIANO → Dallo spettro del corpo nero possono essere determinate le corrispondenti coordinate cromatiche x, y (il suo colore). Al variare della temperatura da 2000 a 20.000K il colore del corpo nero si muove su una curva del diagramma di cromaticità detta luogo planckiano (dal fisico Max Planck che ha descritto le caratteristiche del corpo nero). Se il colore di una sorgente di luce si discosta eccessivamente dalla curva del luogo Planckiano la sua temperatura di colore non è definita.

Se scaldi il corpo nero da 1500 a 10.000K avrai determinati spettri sulla base di cui è possibile determinare le coordinate cromatiche, cioè due coordinate x, y che stanno su un diagramma di cromaticità. Il diagramma rappresenta tutte le tinte (quindi tutti i colori) con i loro vari livelli di saturazione (purezza) percepibili dall'occhio umano.

Al variare della temperatura di colore il corpo nero ha una cromaticità che si muove su una linea detta luogo Planckiano (la curva del bianco).

Quindi all'aumentare della temperatura di colore la luce emessa dal corpo nero si muove su questa linea, più fredda tende all'azzurro e più calda tende al rosso. NB: la temperatura di colore non ha nulla a che vedere con il colore, perché la temperatura di colore è definita solo per le sorgenti di luce bianca e non per le sorgenti di luce colorata.

La temperatura di colore è la temperatura che ha il corpo nero se emette uno spettro simile a quello di una radiazione luminosa che io sto considerando.

Su una lampada (tipo quelle in Università) si legge il numero 840 → la prima cifra 8 indica la resa cromatica Ra (8 sta per 80); aggiungendo due zeri e una K al 40 ottengo (4000K) la CCT, correlated color temperature, temperatura di colore correlata (correlata a quella del corpo nero). Questa sorgente di luce emette una luce di temperatura di colore di 4000K (cioè che starà circa sulla curva del bianco, o poco più sopra/sotto con una distanza inferiore a 0,02; se va oltre a questa distanza la temperatura di colore non è più definita e a quel punto la sorgente di luce sarebbe da considerarsi colorata).

La temperatura di colore di una sorgente di luce è la cromaticità equivalente del corpo nero scaldato alla temperatura che crea quella cromaticità; o diversamente, la temperatura di colore di questa sorgente di luce la ottengo andando a vedere le coordinate cromatiche sul diagramma identificando la temperatura del corpo nero più vicina.

La temperatura di colore, nota anche come tonalità della luce bianca, può essere divisa in tre grandi categorie: (es. luce diurna 5000-7500K, sole al tramonto 2000K) • tonalità calda $K < 3000$ • tonalità intermedia $3300 < K < 5300$ • tonalità fredda $K > 5300$. La luce naturale per noi è sempre considerata tonalità fredda. Se si sceglie per un interno una fluorescente lineare da 5000-6500K mi dà una sensazione molto fredda, più fredda di quella che percepisco all'esterno perché storicamente da quando esiste l'illuminazione artificiale per gli interni siamo stati abituati a utilizzare sorgenti di luce calde (→ cfr. ultima lezione sugli effetti psicofisiologici dell'illuminazione).

Esistono i led tunable white (bianco rinnovabile) dove è possibile regolare la temperatura di colore.

-Nel caso di piccoli led osserviamo la dimostrazione della relazione tra l'area apparente e la luminanza; più i led sono piccoli più sono concentrati e a parità di flusso esce una maggior luminanza. Se gli si pone davanti un materiale diffondente ecco che danno meno fastidio: la luce viene vista da un'area maggiore. A parità di flusso luminoso, più è piccola la superficie da cui esce la luce maggiore è la luminanza, e viceversa più è grande la superficie minore è la luminanza. Ecco perché nell'illuminazione d'interni, le lampade fluorescenti lineari (non lampade al neon!) rappresentano il 60% del mercato dell'illuminazione degli interni. Le stanno sostituendo con tubi a led perché essendo lunghe e grandi non concentrano troppo il flusso ma lo emettono da una superficie maggiore.

APPARECCHI ILLUMINANTI → L'oggetto composto dalla lampada, con il supporto, eventuale parabole, lenti, filtri, alimentatore ecc. è detto apparecchio illuminante. Il termine lampada è a volte usato per la lampadina

o per l'apparecchio creando confusione. La lampada viene anche chiamata sorgente, l'oggetto primario da cui esce la luce.

EFFICIENZA → L'efficienza di una sorgente indica quanti Lumen (flusso) sono emessi per ogni Watt di potenza elettrica consumata. È il rapporto tra flusso totale emesso (quanta luce produce la sorgente) e potenza dissipata (potenza elettrica necessaria per emettere quel flusso).

Parlando di sorgenti di luce c'è un parametro fondamentale che le descrive: l'efficienza.

Se io so che una lampada a incandescenza da 100 Watt di potenza elettrica emette un flusso di 1530 lm, significa che l'efficienza di questa sorgente sarà di 15,3 lm/Watt (1530/100). Significa che per ogni Watt di potenza elettrica consumata questa lampada per ogni Watt emette un flusso di 15,3 lm/Watt. Se si considera quella da 40 Watt scopro che è molto meno efficiente: ha un'efficienza di 10,7 lm/Watt.

(slide 15) Il diagramma confronta lo spettro reale, assoluto emesso dalla lampada da 100 Watt e dalla lampada da 40 Watt al variare della lunghezza d'onda; nella zona tratteggiata identifichiamo le radiazioni visibili (luce). Significa che la lampada emette luce solo in quella zona mentre oltre il rosso (in corrispondenza cioè dell'infrarosso) c'è calore; la quantità di energia è molto più grande (ragion per cui queste lampade sono state messe al bando. In questa categoria di lampade a incandescenza rientrano anche le alogene).

RESA CROMATICA → Indicata con Ra o IRC (indice di resa cromatica) o CRI (chromatic rendering index).

Descrive la capacità di una sorgente di luce di rendere visivamente il colore degli oggetti rispetto ad una sorgente di riferimento. È calcolata utilizzando 8+6 colori campione presi dal sistema cromatico Munsell. Può essere immaginata come una descrizione della continuità e pienezza dello spettro della sorgente di luce.

La resa cromatica descrive la capacità di una sorgente di luce nel farci vedere bene i colori, cioè nel modo più naturale possibile.

Temperatura di cromatica e resa cromatiche sono due cose completamente diverse, una è disgiunta dall'altra. Non è detto che una sorgente più calda/fredda mi faccia vedere meglio i colori.

La CIE descrisse un metodo per determinare la resa cromatica delle sorgenti di luce.

Dei 14 colori Munsell utilizzati per calcolare la resa cromatica Ra, i primi 8 sono scelti (con moderata saturazione e uguale chiarezza) per dividere uniformemente il cerchio delle tinte e servono a calcolare Ra. Se ne considerano poi altri 6 ulteriori per farne i calcoli supplementari e sono rappresentativi di 4 tinte sature fondamentali (rosso, giallo, verde, blu), della pelle umana bianca (razza caustica) e delle foglie verdi.

La resa cromatica può essere anche immaginata come una misura della pienezza dello spettro: più lo spettro è pieno, cioè più lo spettro contiene tutte le onde monocromatiche (cioè tutti i colori), più farà vedere bene tutti i colori.

La resa cromatica è massima per la luce naturale. Una buona resa cromatica in genere va contro l'esigenza di efficienza della sorgente (esempi di sorgenti classiche pre era LED). Il metodo si basa sul calcolo delle differenze colore che 8 campioni presentano cambiando l'illuminazione da una sorgente di riferimento a quella considerata.

La resa cromatica viene calcolata con un metodo in relazione a due sorgenti di riferimento:

-Se la temperatura di colore è maggiore di 5000K (fredda), la sorgente di riferimento scelta è la luce naturale avente temperatura di colore più vicina a quella della sorgente da verificare.

-Se la temperatura di colore è minore di 5000K (calda), la sorgente di riferimento, quella cioè considerata ottimale per poter vedere i colori, è lo spettro di emissione del corpo nero di pari temperatura di colore.

Vero è che il corpo nero è un'astrazione della fisica ma in natura esiste un materiale chimico (tungsteno) che è il più simile al corpo nero. Il tungsteno è lo stesso materiale che c'è anche nel filamento delle lampade alogene che, avendo una temperatura molto più alta di quelle a incandescenza, hanno un comportamento che è ancora più simile al quello del corpo nero.

Quindi la sorgente di riferimento quando la temperatura di colore è sotto i 5000K viene generalmente presa come sorgente a incandescenza tipo corpo nero/ tipo alogeno. Questo indice ha un valore compreso tra 0-100 (esistono solo 2 sorgenti che hanno resa cromatica 100 e sono la luce naturale e la lampadina alogena). Tutte le altre hanno valori minori. La norma che riguarda gli interni dice che l'illuminazione degli interni deve essere fatta con una resa cromatica Ra minima di 80.

Nell'ambito di un progetto di interni, un sorgente di luce con resa cromatica massima rende l'ambiente più veritiero, più definibile, più percepibile e nell'ottica di una stabilità percettiva che non dovrebbe cambiare troppo dal momento in cui l'interno è illuminato dalla sola luce naturale che entra dalle finestre o dal momento che è illuminato solo la illuminazione artificiale.

Ma la resa cromatica costa: fare uno spettro pieno a tutte le lunghezze d'onda richiede più energia elettrica. Le sorgenti di luce con la più alta resa cromatica sono in realtà le meno efficienti, cioè consumano tanta energia elettrica.

La lampada a vapore di sodio a bassa pressione ha una resa cromatica zero, ciò significa che sotto questo tipo di illuminazione (che ci si aspetterebbe di vedere tutto giallo) si vede tutto in tonalità di grigio, perché si perde la capacità di distinguere i colori.

Ma l'indice di resa cromatica non funziona bene in particolar per i LED bianchi: vi è un problema scientifico e commerciale.

LA FORMA DELLA LUCE (SOLIDO FOTOMETRICO)→ Una sorgente puntiforme ideale emette luce con la stessa intensità luminosa in tutte le direzioni. Gli apparecchi reali emettono luce con intensità luminosa differente in funzione della direzione rispetto ad un asse di riferimento. L'asse di riferimento coincide in genere con l'asse geometrico dell'apparecchio o della sorgente.

Il solido fotometrico è un diagramma tridimensionale polare (quindi definito rispetto a un centro) che indica com'è l'intensità della luce emessa in tutte le direzioni.

Quello che interessa è il solido fotometrico dell'apparecchio illuminante (piuttosto che quello della lampada) dove la luce che esce non è mai uniforme in tutte le direzioni perché sono contenuti degli elementi (schermi, ottiche ecc).

Le alette antiabbagliamento in alcune tipologie di lampade servono per osservare la sorgente in modo opportuno e tipicamente sono orientate nella direzione di osservazione.

SOLIDO FOTOMETRICO→ (Photmetric Web, LID light intensity distribution). La distribuzione non uniforme è dovuta alla differenza intrinseca della sorgente reale rispetto al caso puntiforme ideale, alla presenza di schermi/riflettori/ottiche (es. lente di Fresnell che serve per concentrare il fascio luminoso). Le aziende illuminotecniche usano presentare questa caratteristica tramite un diagramma detto solido fotometrico (rapp. tramite piani di sezione).

Normalmente nei cataloghi le intensità luminose sono normalizzate, ovvero riferite a 1000lm (o Klm) della lampada; ciò si ottiene dividendo il valore dell'intensità misurata, per il flusso della lampada espresso in lm e moltiplicando il risultato per 1000.

Per riottenere l'intensità reale (candele assolute) occorrerà moltiplicare per il flusso nominale della lampada e dividere per 1000.

– Il dato presente nel solido fotometrico è anch'esso un dato normalizzato (3° esempio di **normalizzazione**).

1. La 1° normalizzazione: passando dall'efficacia fotopica umana all'efficienza fotopica umana

2. La 2° normalizzazione: passando dallo spettro di potenza radiante allo spettro di potenza relativa

3. La 3° normalizzazione: dato riportato nel solido fotometrico in realtà non è l'intensità luminosa misurata, ma è una grandezza proporzionale e normalizzata ottenuta dalla divisione dell'intensità luminosa misurata per il flusso luminoso emesso dalla sorgente luminosa che sta all'interno, e moltiplicando il risultato per 1000.

– Es. di solido fotometrico: centroide di emissione, angoli gamma (elevazioni), angoli di rotazione. L'asse primario è l'asse che dal centro viene giù verso il basso; l'asse secondario è quello che passa attraverso la sezione di minor dimensione dell'apparecchio di illuminazione (viaggia trasversalmente all'apparecchio), l'asse terziario è quello che passa per la dimensione maggiore.

($C=0$ è asse secondario, $C=90^\circ$ è asse terziario, $\gamma=0$ verso il basso indica la direzione verso il basso dove va la luce).

Dall'esempio di questo solido fotometrico osserviamo che è emessa molta più luce verso l'alto che verso il basso. Nella maggior parte del moderno lighting design non si sceglie mai un'illuminazione diretta verso il basso perché questo rende l'ambiente meno confortevole provocando il cosiddetto effetto caverna con degli impatti psicoperceptivi negativi. Una parte di luce viene sempre sparata verso il plafone per far sì che sia più luminoso e quindi ci sia meno contrasto tra gli apparecchi di illuminazione e il plafone, ma ci sia piuttosto un cielo luminoso come avviene negli esterni.

– Il solido fotometrico può anche essere rappresentato non in 3D ma attraverso sezioni: la curva blu è quella sull'asse primario (da 0-180°), la curva rossa è quella sull'asse terziario (90-270°). Guardando l'apparecchio sull'asse terziario lo sto valutando sulla curva rossa, guardandolo sull'asse primario ho tanta luce che esce, lo sto valutando sulla curva blu. Spesso gli apparecchi hanno questa emissione ad ala di pipistrello perché da un punto centrale devo cercare di illuminare in maniera uniforme tutta la superficie sottostante.

LA LUCE NATURALE → La luce naturale è estremamente variabile e può provenire direttamente dal sole o dal cielo (terso o offuscato da nubi). Il sole ha mediamente una temperatura di colore compresa tra 6000-6700K. Il colore cambia a causa del filtraggio (diretto o filtrato) dell'atmosfera.

d indica daylight (luce naturale); dalla CIE sono definiti degli illuminanti standard detti della serie D, che definiscono il variare dello spettro d al variare della temperatura di colore.

