



Università degli Studi di Cassino
Facoltà di Ingegneria - Polo di Frosinone

Lezioni del Corso

Tecnica del Controllo Ambientale

lezione n.02

A.A. 2005-2006 docente: ing. Giorgio Ficco



Indice

1. Il Colore
2. Le Sorgenti Luminose
3. Elementi di Progettazione Illuminotecnica
4. Contrasto ed Abbagliamento
5. Il Benessere Visivo





Le Grandezze Fotometriche

- (1) **intensità luminosa (I , cd)**
rapporto tra flusso luminoso ed angolo solido
- (2) **flusso luminoso (f , lm)**
quantità totale di energia luminosa emessa da una sorgente in un intervallo di tempo (potenza)
- (3) **luminanza (L , cd/m^2)**
rapporto tra l'intensità luminosa irradiata e la superficie emittente apparente (proiezione della superficie emittente sull'ortogonale alla direzione)
- (4) **radianza (R , $lm\ s.b.$)**
radiazione visibile emessa da una superficie riflettente (bianco di riferimento)
- (5) **illuminamento (E , lm/m^2)**
quantità di luce che arriva su una superficie - *lux* ($lumen/m^2$)

**Le Grandezze Fotometriche**

<i>Simbolo</i>	<i>Grandezza</i>	<i>Espressione</i>	<i>Unità di misura</i>
Φ	Flusso Luminoso	$K(\lambda) \cdot P(\lambda)$	Lumen (<i>lm</i>)
E	Illuminamento	$\frac{d\phi}{dA}$	Lux (lm/m^2)
I	Intensità Luminosa	$\frac{d\phi}{d\Omega}$	Candela (<i>lm/sr</i>)
L	Luminanza	$\frac{dI}{dA \cos \alpha}$	Nit (cd/m^2)
M	Radianza	$\frac{d\phi}{dA}$	Lux s.b. (lm/m^2)



(1) *intensità luminosa* (I , cd) e (2) *flusso luminoso* (ϕ , lm) sono caratteristiche proprie della sorgente luminosa, mentre l'illuminamento rappresenta l'effetto da questa prodotto su una superficie ricevente; l'*intensità luminosa* è la grandezza fotometrica fondamentale e la sua unità di misura, la *candela* (cd), è una delle 7 unità di misura fondamentali del SI.

(3) *luminanza* (L , cd/m^2) e (4) *radianza* (R , $lm\ s.b.$) sono grandezze rappresentative sia delle sorgenti illuminanti che delle superfici riceventi

5) *illuminamento* (E , lm/m^2) e luminanza sono le grandezze utilizzate nelle normative per il benessere visivo:

- quanta luce occorre per un compito visivo (*illuminamento*)
- contenimento dei fenomeni di abbagliamento (*luminanza*)



Definizione di Colore

La sensazione visiva di colore è caratterizzata essenzialmente da tre aspetti:

- **tono/tinta** è legato alla lunghezza d'onda dominante e individua il colore con cui viene visto un oggetto
- **purezza/saturazione** rappresenta la quantità di dominante presente ed è la vivacità del colore che si differenzia dalla visione di grigio (una lunghezza d'onda monocromatica fornisce un colore puro; lo stesso colore può essere ottenuto con luci diverse ma la sua saturazione diminuisce)
- **luminanza/luminosità** esprime l'intensità luminosa nella direzione della visione (quantità di bianco).



1. Il Colore

La sensazione visiva, a differenza di quella uditiva, non permette di distinguere in un fascio luminoso policromatico le componenti monocromatiche.

Il sistema CIE adottato a partire dal 1931 definisce univocamente ed in modo matematico una radiazione luminosa dal punto di vista cromatico, attraverso la quantificazione di due coordinate numeriche.

Il sistema CIE nasce dalla constatazione sperimentale che dalla combinazione di tre luci colorate è sempre possibile ottenere un fascio luminoso che dia la stessa sensazione di colore di una luce qualsiasi. Leggi di **Grassmann**:

$$L(\lambda) = L_R + L_V + L_B$$

$$nL(\lambda) = nL_R + nL_V + nL_B$$

$$L_1(\lambda_1) + L_2(\lambda_2) = (L_{R1} + L_{R2}) + (L_{V1} + L_{V2}) + (L_{B1} + L_{B2})$$

La percezione di un colore dipende da:

- ✚ parametri *oggettivi* (composizione spettrale della radiazione)
- ✚ parametri *soggettivi* (sensibilità dell'occhio ad alcune radiazioni)

Si rende necessaria la definizione di un sistema univoco di valutazione, per l'importanza che il colore assume in ambito commerciale ed industriale.

La CIE (*Commissione Internazionale dell'Illuminazione*) ha introdotto il **triangolo tricromatico** per determinare le caratteristiche spettrali di sorgenti primarie normalizzate, capaci di riprodurre tutti i colori per miscela additiva. Dal *diagramma tricromatico* è possibile ricavare, note le coordinate del colore, la sua lunghezza d'onda e la sua saturazione.

1. Il Colore

Il CIE ha definito tre colori fondamentali, con le seguenti caratteristiche:

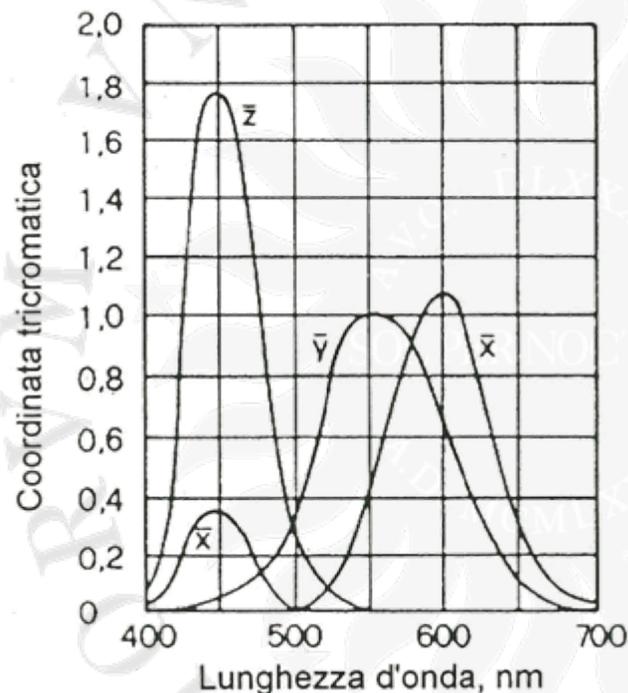
ROSSO (R)	$\lambda=700$ nm	$L_R=1$ nit
VERDE (V)	$\lambda=546,1$ nm	$L_V=4,5909$ nit
BLU (B)	$\lambda=435,8$ nm	$L_B=0,06012$ nit

Nella figura sono rappresentate $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$

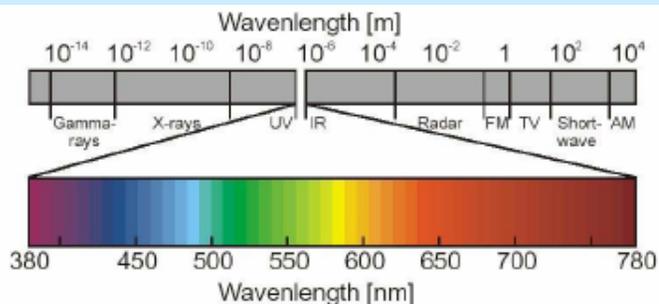
Ossia **le quantità** dei colori primari (R, V, B) necessarie per riprodurre lo stimolo cromatico generato da quantità unitarie di energia di una radiazione generica di lunghezza d'onda λ .

In pratica le curve $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ rappresentano la sensibilità dell'osservatore medio al rosso, al verde ed al blu, rispettivamente.

La curva $\bar{y}(\lambda)$ coincide con quella del fattore di visibilità in visione fotopica.



1. Il Colore



Indicata con $f(\lambda)$ la funzione che valuta lo stimolo della sensazione visiva:

$$X = \text{cost} \sum f(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$Y = \text{cost} \sum f(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$Z = \text{cost} \sum f(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda$$

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

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

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

λ	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}	λ	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}	λ	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
380	0,0014	0,0000	0,0065	525	0,1096	0,7932	0,0573	675	0,0636	0,0232	
385	0,0022	0,0001	0,0105	530	0,1655	0,8620	0,0422	680	0,0468	0,0170	
390	0,0042	0,0001	0,0201	535	0,2257	0,9149	0,0298	685	0,0329	0,0119	
395	0,0076	0,0002	0,0362	540	0,2904	0,9540	0,0203	690	0,0227	0,0082	
400	0,0143	0,0004	0,0679	545	0,3597	0,9802	0,0134	695	0,0158	0,0057	
405	0,0232	0,0006	0,1102	550	0,4334	0,9950	0,0087	700	0,0114	0,0041	
410	0,0435	0,0012	0,2074	555	0,5121	1,0002	0,0057	705	0,0081	0,0029	
415	0,0776	0,0022	0,3713	560	0,5945	0,9950	0,0039	710	0,0058	0,0021	
420	0,1344	0,0040	0,6456	565	0,6784	0,9786	0,0027	715	0,0041	0,0015	
425	0,2148	0,0073	1,0391	570	0,7621	0,9520	0,0021	720	0,0029	0,0010	
430	0,2839	0,0116	1,3858	575	0,8425	0,9154	0,0018	725	0,0020	0,0007	
435	0,3285	0,0168	1,6230	580	0,9163	0,8700	0,0017	730	0,0014	0,0005	
440	0,3483	0,0230	1,7471	585	0,9786	0,8163	0,0014	735	0,0010	0,0004	
445	0,3481	0,0298	1,7826	590	1,0263	0,7570	0,0011	740	0,0007	0,0003	
450	0,3362	0,0380	1,7721	595	1,0567	0,6949	0,0010	745	0,0005	0,0002	
455	0,3187	0,0480	1,7441	600	1,0622	0,6310	0,0008	750	0,0003	0,0001	
460	0,2908	0,0600	1,6692	605	1,0456	0,5668	0,0006	755	0,0002	0,0001	
465	0,2511	0,0739	1,5281	610	1,0026	0,5030	0,0003	760	0,0002	0,0001	
470	0,1954	0,0910	1,2876	615	0,9384	0,4412	0,0002	765	0,0001	0,0000	
475	0,1421	0,1126	1,0419	620	0,8544	0,3810	0,0002	770	0,0001	0,0000	
480	0,0956	0,1390	0,8130	625	0,7514	0,3210	0,0001	775	0,0001	0,0000	
485	0,0580	0,1693	0,6162	630	0,6424	0,2650	0,0000	780	0,0000	0,0000	
490	0,0320	0,2080	0,4652	635	0,5419	0,2170	0,0000				
495	0,0147	0,2586	0,3533	640	0,4479	0,1750	0,0000				
500	0,0049	0,3230	0,2720	645	0,3608	0,1382	0,0000				
505	0,0024	0,4073	0,2123	650	0,2835	0,1070	0,0000				
510	0,0093	0,5030	0,1582	655	0,2187	0,0816					
515	0,0291	0,6082	0,1117	660	0,1649	0,0610					
520	0,0633	0,7100	0,0782	665	0,1212	0,0446					
				670	0,0874	0,0320					
								Σ	21,37	21,37	21,37



Vale sempre che $x+y+z=1$ quindi il colore potrà essere sempre individuato con due sole coordinate (normalmente x,y).

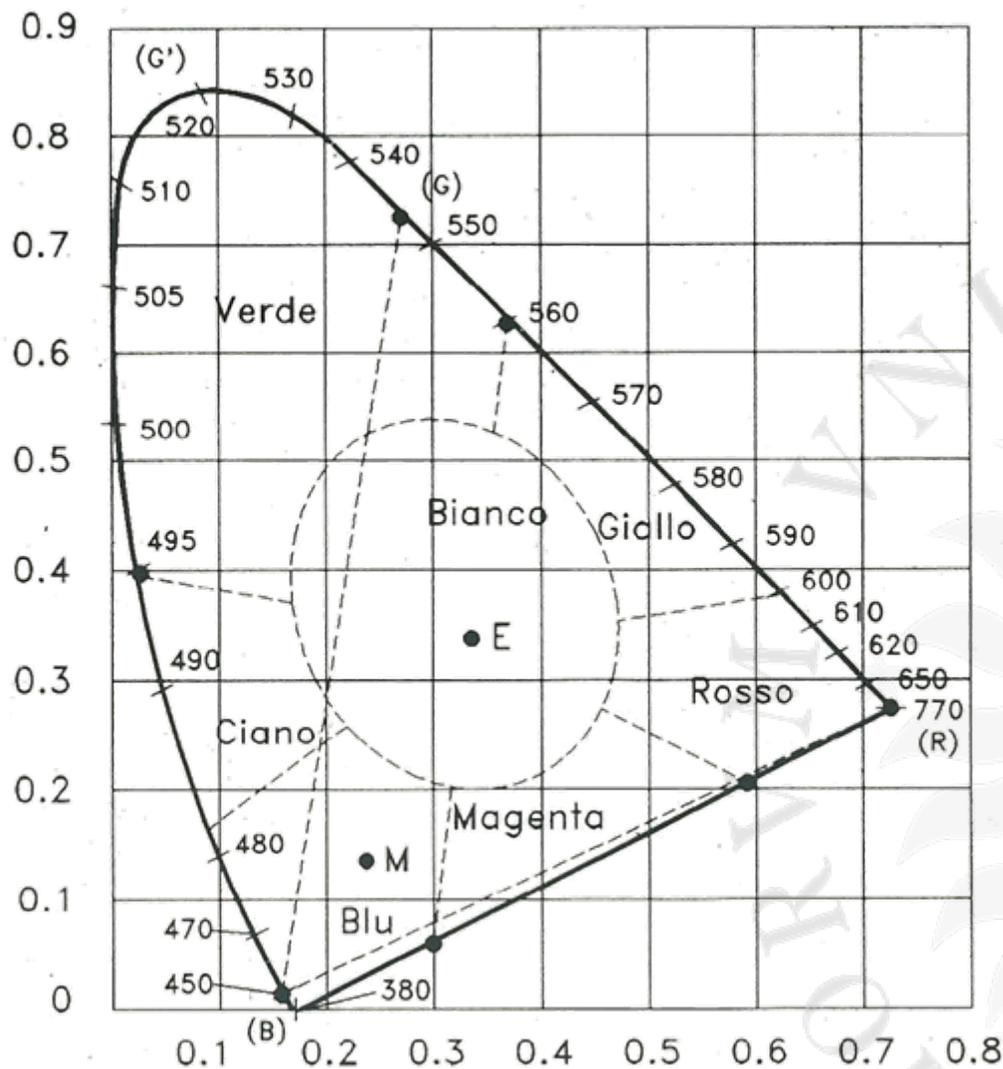
Il diagramma colorimetrico CIE è una rappresentazione piana di uno stimolo di colore. In esso si riconoscono le aree dei colori fondamentali (nei tre vertici, blu, rosso e verde) e dei tre complementari (giallo, magenta e ciano)

Il diagramma CIE è un triangolo equilatero, ai cui vertici sono posti i tre colori primari - rosso, verde e blu, appunto, indicati come X, Y e Z - considerati ipersaturi in modo da racchiudere nella propria configurazione la curva dei colori spettrali, evitando valori positivi o negativi delle coordinate.

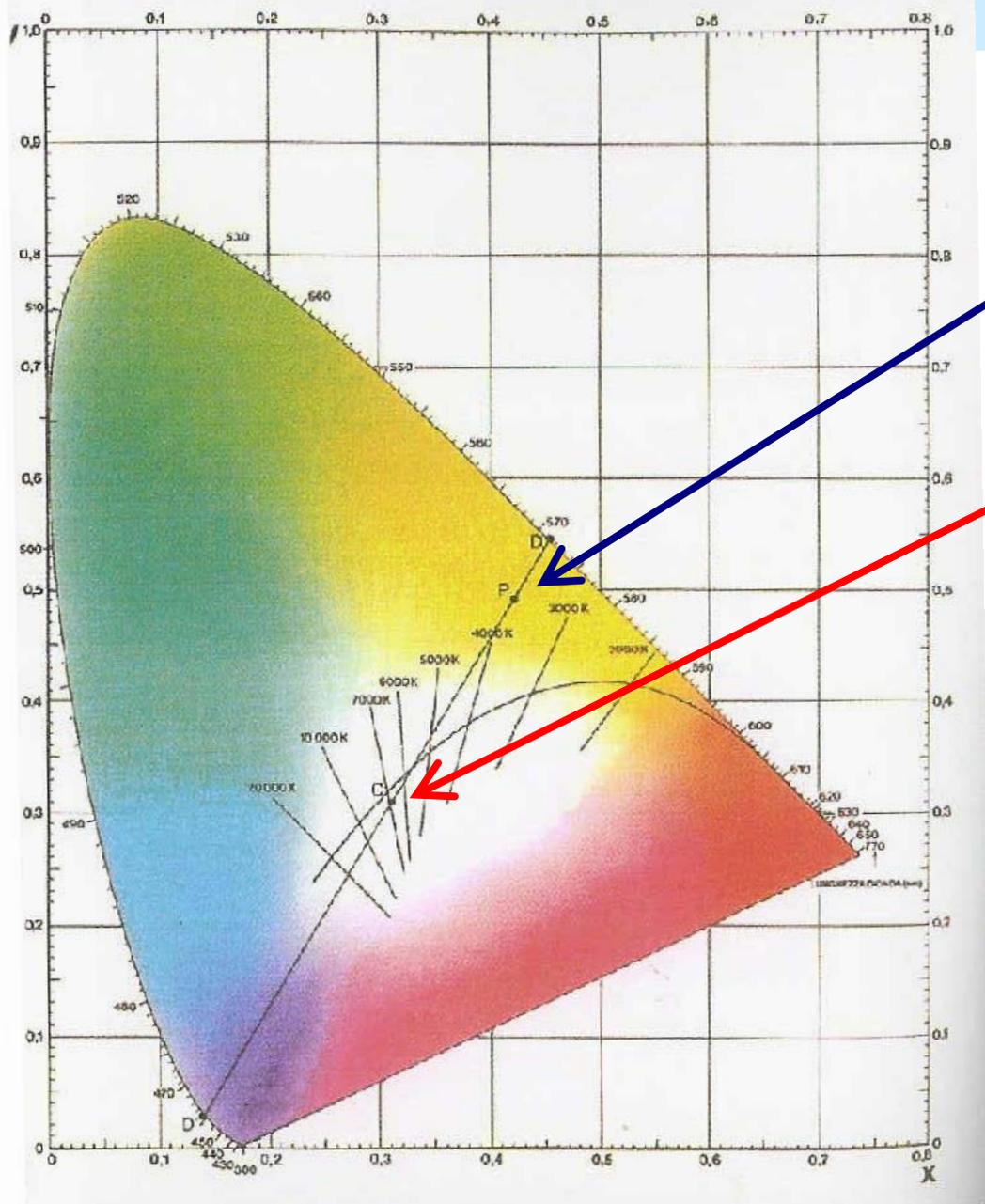
Il punto W, definito dalle coordinate $x=y=z=0,333$ rappresenta il "bianco di uguale energia" o punto acromatico di riferimento.



1. Il Colore



1. Il Colore



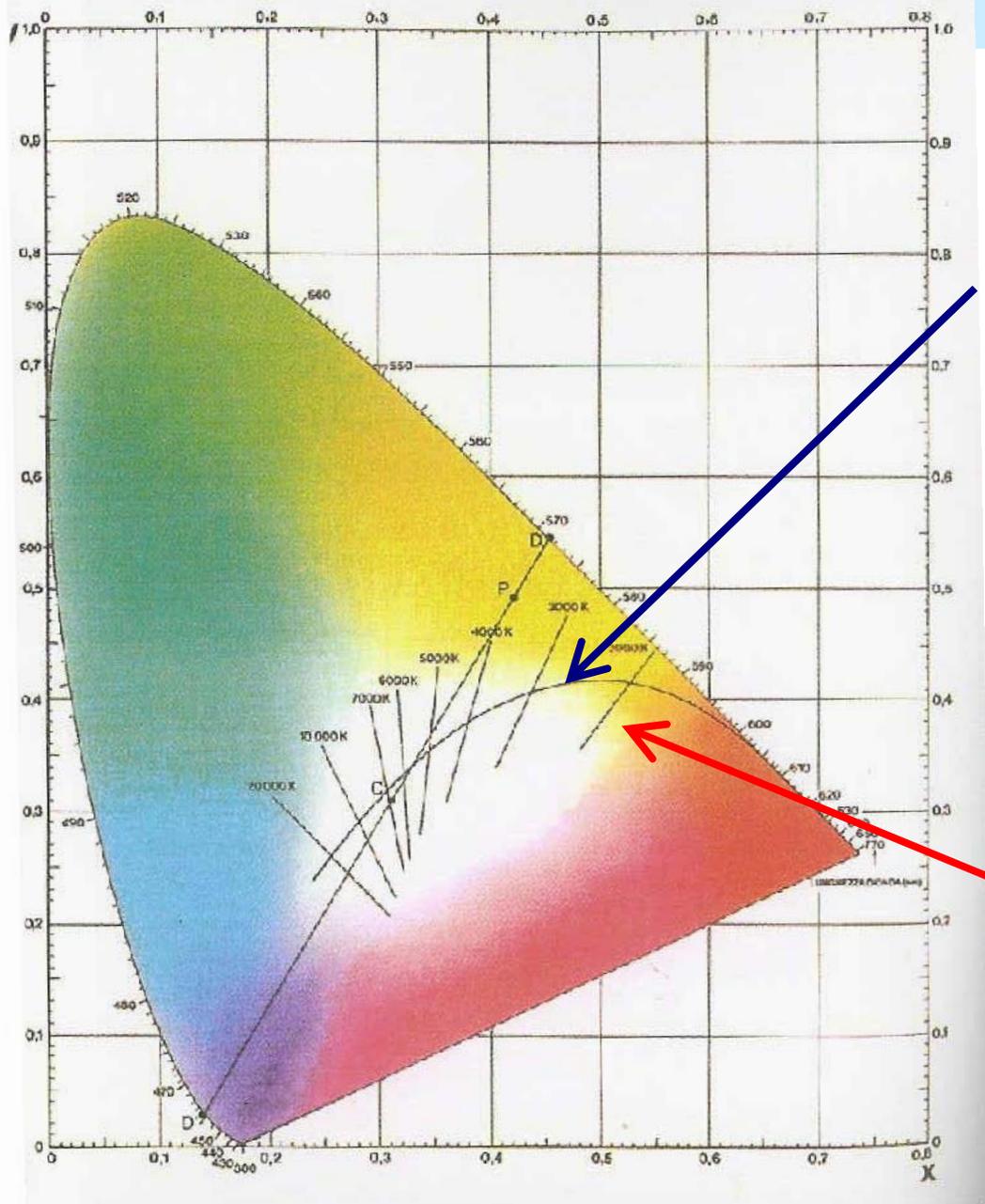
Immaginiamo di avere un campione rappresentato dal punto P (miscela equilibrata di rosso e verde,) con coordinate $x=0,42$ $y=0,49$ ($z=0,09$).

La dominante si ottiene congiungendo il punto P con il bianco di riferimento ($x=y=z=0,33$).

L'intersezione della retta con il perimetro fornisce la λ dominante (nel diagramma 570 nm); mentre il rapporto tra i segmenti CP e CD è la saturazione (nell'esempio 0,76).

Questo significa che per ottenere il colore scelto deve essere diluito il dominante con il 24% di bianco

1. Il Colore

**Curva di Planck**

rappresenta il *luogo del corpo nero*,
ossia la curva delle coordinate
tricromatiche caratteristiche della
radiazione emessa da un corpo nero a
diverse temperature.

Retta Isocromatica

Ogni punto di questa retta gode
della proprietà di avere la stessa
Temperatura di colore



La misura del Colore

Il colorimetro consente di effettuare misure di colore sulle sorgenti luminose e sulle superfici colorate secondo il sistema CIE

Il colorimetro è costituito da una testa fotometrica da tre cellule fotoelettriche, ognuna delle quali ha una risposta che riproduce la curva di visibilità dell'occhio umano secondo i tre colori fondamentali. Si hanno quindi tre risposte proporzionali ai tre colori.

Le curve di risposta sono generalmente ottenute mediante filtri che posseggono appropriate caratteristiche di assorbimento.

Il segnale può essere convertito dai fotorilevatori direttamente in coordinate tricromatiche oppure in temperatura di colore o indice di resa cromatica.



Resa dei Colori delle Sorgenti Luminose

Un vetro trasparente colorato appare di un determinato colore perché si lascia attraversare dalle lunghezze d'onda relative a quel colore mentre assorbe o riflette tutte le rimanenti.

Se nello spettro di emissione della sorgente incidente non sono presenti le lunghezze d'onda del materiale osservato, il suo colore sarà alterato.

È quindi importante per avere una buona resa dei colori che nello spettro di emissione della sorgente luminosa siano presenti tutte le lunghezze d'onda, ciascuna con valori quantitativi equilibrati



2. Le sorgenti Luminose

La **Temperatura di Colore (TC, K)** è definita come la temperatura di un corpo nero espressa in Kelvin che emette luce avente lo stesso colore della luce emessa dalla lampada (la luce rossastra ha una bassa temperatura di colore, la luce bluastra ha un'elevata temperatura di colore)

- il sole ha una TC di circa 6000 K
- il filamento di una lampadina normale ha una TC di circa 2200 K
- una lampada allo iodio ha una TC di circa 2500 K.

TC (K) è un parametro che individua in modo oggettivo il **colore della luce di una sorgente luminosa** confrontata con la sorgente campione (il corpo nero).

Il corpo nero emette in tutte le zone dello spettro il massimo dell'energia raggiante e di assorbire completamente l'energia raggiante che lo colpisce.

Dire che una lampada ha una TC di 3000 K, significa che il corpo nero, a questa temperatura, emette luce della stessa tonalità.

A temperatura ambiente il corpo nero apparirà nero, sarà rosso ad 800 K, giallo a 3000K, bianco caldo a 4000K, bianco freddo a 5000K e azzurro a 8000K.



2. Le sorgenti Luminose

La TC è un parametro di importanza fondamentale nei casi in cui si intende abbinare la luce artificiale a quella naturale.

Di seguito sono riportate le TC di alcune sorgenti luminose naturali:

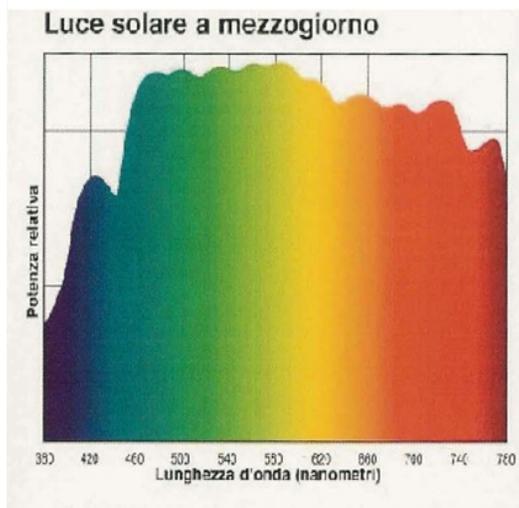
- + Luna 4100 K
- + Sole a mezzo giorno (estate) 5300 / 5800 K
- + Cielo coperto 6400 / 6900 K
- + Cielo sereno blu intenso 10000 / 25000 K

In funzione della TC le sorgenti luminose si dividono (classificazione CIE) in:

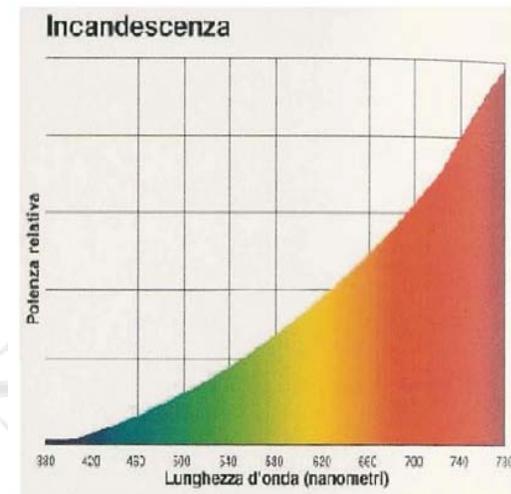
- | | |
|---|---------------------------------------|
| + tonalità calda ($TC < 3300$ K) | cl.1 (W) <i>abitazioni e alberghi</i> |
| + tonalità neutra ($3300 < TC < 5300$ K) | cl.2 (I) <i>ambienti comuni</i> |
| + tonalità fredda ($TC > 5300$ K) | cl.3 (C) <i>uffici ed industria</i> |

2. Le sorgenti Luminose

La luce solare alle 12 mostra grande uniformità, sia in termini di λ presenti che di potenza di ciascuna di esse

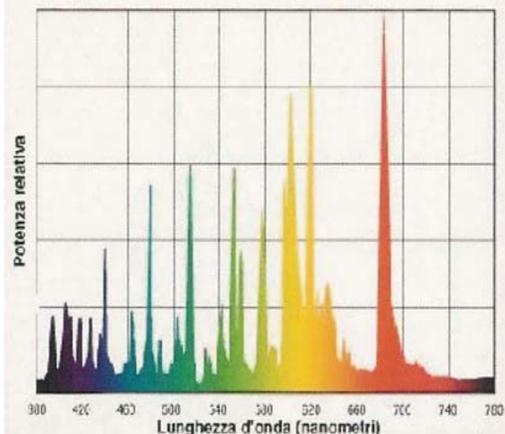


In una lampada ad incandescenza c'è ridotta emissione nella fascia bassa dello spettro (non sono ben resi i colori a dominante blu)



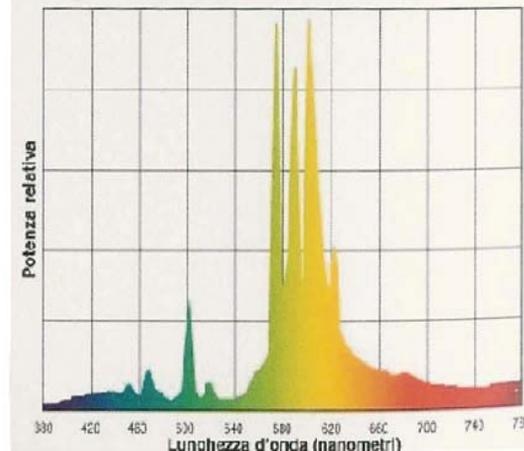
Alogenuri metallici POWERSTAR®

In una lampada ad alogenuri metallici l'emissione è ben bilanciata, ma sono presenti alcuni buchi su alcune radiazioni

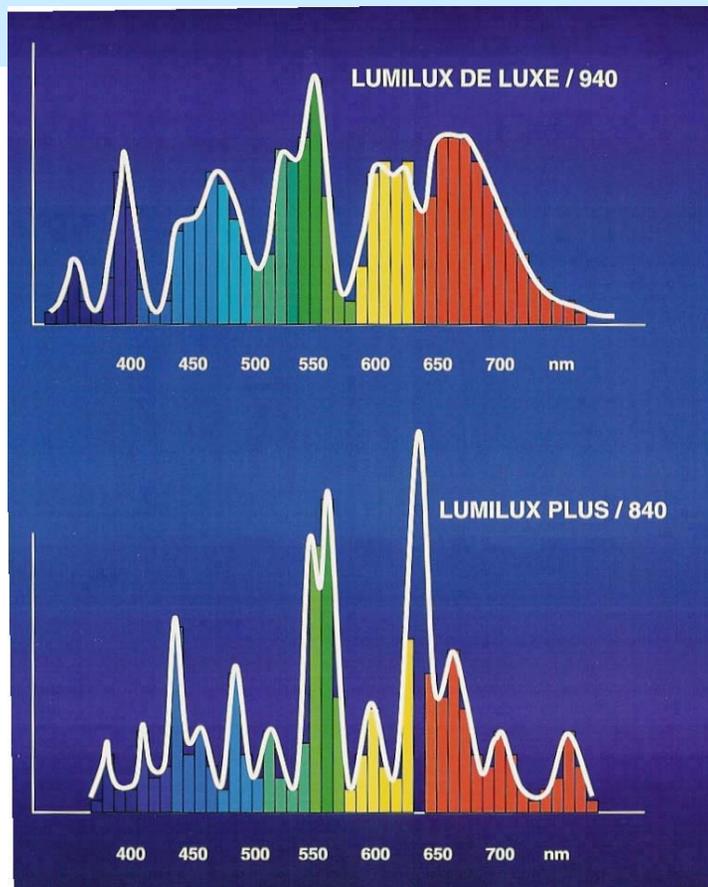


Sodio ad alta pressione VIALOX®

Una lampada al sodio mostra un'intensa concentrazione di energia nella parte giallo-verde dello spettro. Gli altri colori sono resi in maniera poco efficace

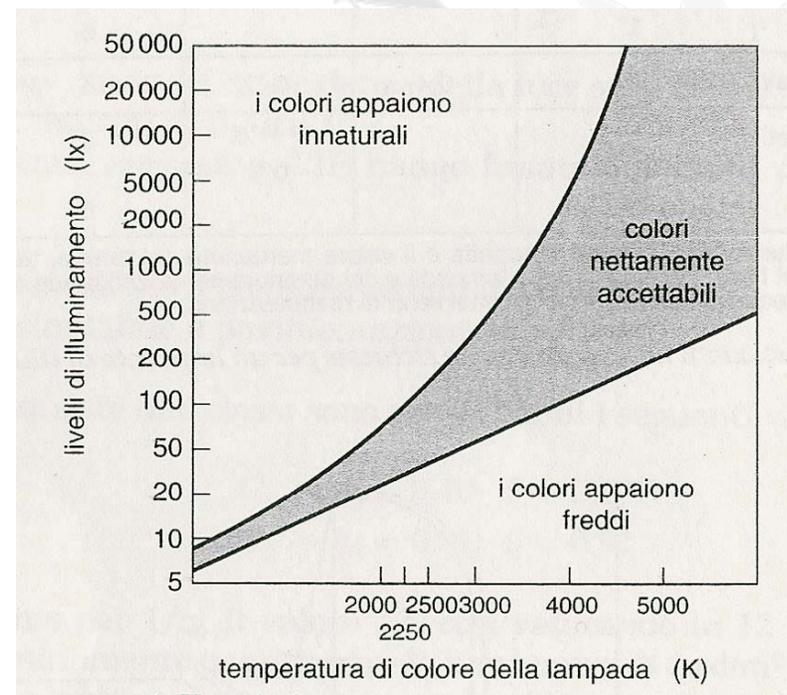


2. Le sorgenti Luminose



La Temperatura di Colore rappresenta la sommatoria dell'energia emessa su tutto lo spettro, possono esserci sorgenti con uguale TC ma distribuzione spettrale differente: ne deriva una diversa sensazione di colore

Il diagramma di ***Kruithof*** mette in relazione la Temperatura di Colore ed i Livelli di Illuminamento (lx). L'area ombreggiata raccoglie le correlazioni giudicate soddisfacenti in termini di benessere.





2. Le sorgenti Luminose

L'indice di Resa Cromatica (IRC, %)

L'effetto cromatico di una superficie dipende sia dal suo colore effettivo che dal tipo di sorgente luminosa. *L'indice di resa cromatica (IRC Colour Rendering Index)* è la misura di quanto una sorgente luminosa è capace di rendere i colori.

CIE (1948) – divisione dello spettro visibile in otto bande e confrontando la qualità della luce contenuta in ciascuna banda con quella contenuta nella banda corrispondente della sorgente di riferimento.

CIE 1965-74 - ΔE_{ai} scostamento di resa colore dai colori prova. IRC è un numero che esprime in percentuale il rapporto tra la definizione cromatica di otto colori campioni illuminati da una sorgente qualsiasi e la definizione degli stessi illuminati da una sorgente campione di riferimento CIE.

IRC è un fattore numerico ed ha indice 100. La resa cromatica è:

- ottima con IRC tra 85 e 100
- buona con IRC tra 70 e 85
- discreta con IRC tra 50 e 70.



2. Le sorgenti Luminose

La sorgente campione, a rigore il corpo nero, è un metallo, al quale viene somministrata una quantità di calore crescente, portandolo all'incandescenza. Aumentando la temperatura, cambierà colore passando dal rosso cupo fino all'azzurro, per il bianco.

Una superficie appare di un determinato colore, ad esempio il rosso, perché si lascia attraversare dalle lunghezze d'onda di quel colore, mentre assorbe o riflette tutte le altre; se poi nello spettro di emissione della sorgente incidente non sono presenti le lunghezze d'onda del materiale osservato, il suo colore risulterà alterato.

E' importante per avere una buona resa dei colori che nello spettro di emissione della sorgente luminosa siano presenti tutte le lunghezze d'onda, ciascuna con valori quantitativi equilibrati.

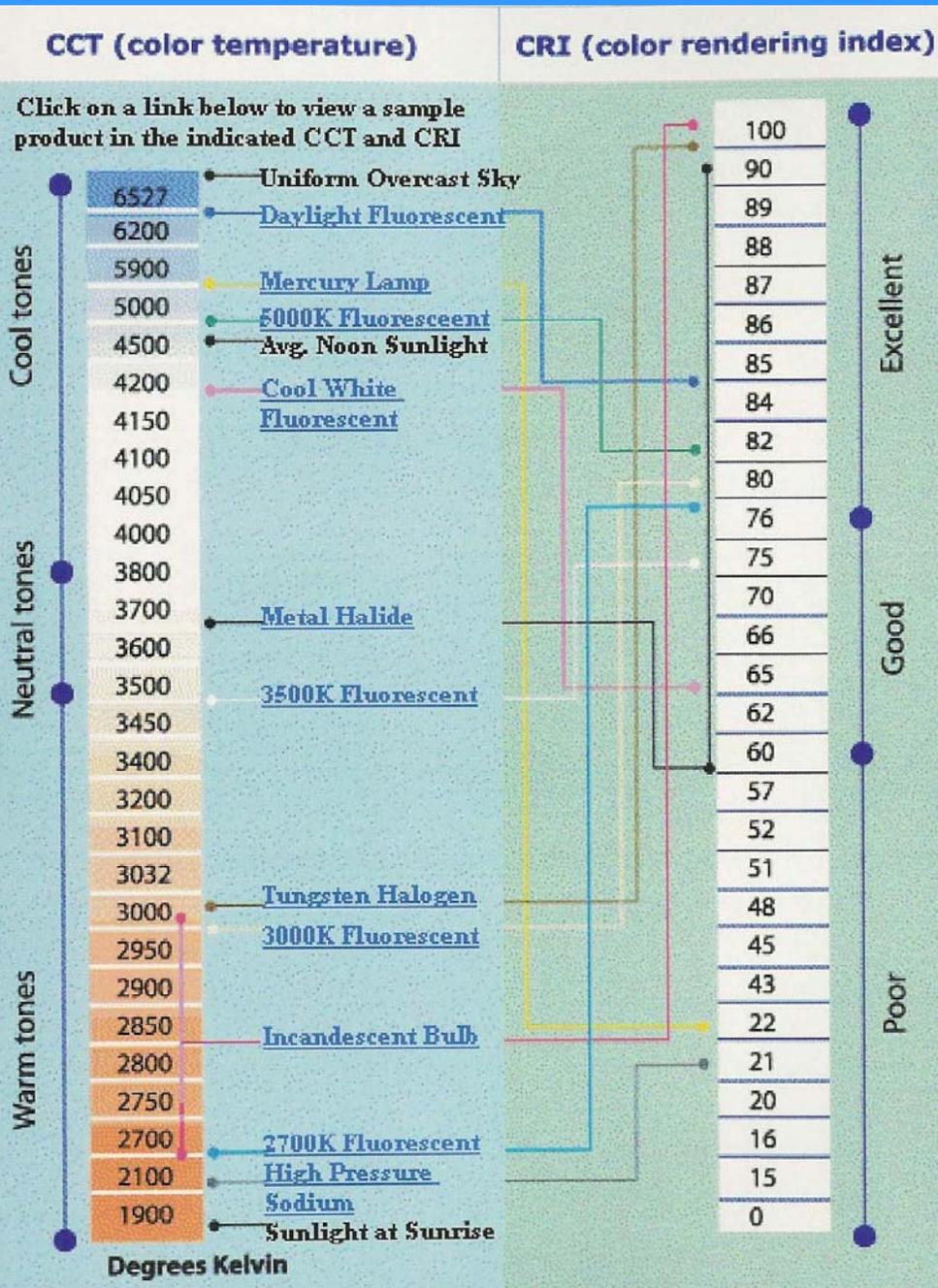
2. Le sorgenti Luminose

1		Munsell 7,5R64	XYZ 33,71 30,05 27,55	xy 0,3692 0,3291	RGB 180 137 129	CIE Lab 61,70 15,35 10,89	CMYK 20 36 40 9
2		Munsell 5Y64	XYZ 28,83 30,05 17,10	xy 0,3794 0,3955	RGB 161 147 97	CIE Lab 61,70 -2,46 28,97	CMYK 20 25 44 16
3		Munsell 5GY68	XYZ 23,23 30,05 8,30	xy 0,3772 0,4080	RGB 130 157 53	CIE Lab 61,70 -25,55 51,46	CMYK 30 20 61 18
4		Munsell 2,5G64	XYZ 21,83 30,05 23,85	xy 0,2892 0,3963	RGB 96 161 117	CIE Lab 61,70 -31,43 16,67	CMYK 45 20 37 16
5		Munsell 10BG64	XYZ 25,17 30,05 42,41	xy 0,2578 0,3078	RGB 102 156 161	CIE Lab 61,70 -17,16 -8,14	CMYK 43 21 20 16
6		Munsell 5PB68	XYZ 29,99 30,05 67,03	xy 0,2360 0,2365	RGB 114 149 203	CIE Lab 61,70 1,94 -31,57	CMYK 54 41 20 0
7		Munsell 2,5P68	XYZ 35,10 30,05 61,55	xy 0,2770 0,2372	RGB 159 137 195	CIE Lab 61,70 20,70 -26,92	CMYK 33 42 20 3
8		Munsell 10P68	XYZ 37,90 30,05 48,35	xy 0,3259 0,2584	RGB 187 129 173	CIE Lab 61,70 29,29 -14,48	CMYK 20 42 25 6

9		Munsell 4,5R413	XYZ 21,64 12,00 5,77	xy 0,5492 0,3046	RGB 180 46 61	CIE Lab 41,22 55,52 25,58	CMYK 20 72 66 9
10		Munsell 5Y810	XYZ 56,21 59,10 13,14	xy 0,4376 0,4801	RGB 229 199 57	CIE Lab 81,35 -4,27 71,68	CMYK 9 21 77 0
11		Munsell 4,5G58	XYZ 12,12 19,77 15,61	xy 0,2551 0,4162	RGB 22 138 96	CIE Lab 51,57 -42,24 14,65	CMYK 85 19 36 25
12		Munsell 3PB311	XYZ 6,68 6,55 30,77	xy 0,1517 0,1490	RGB 0 0 0	CIE Lab 30,77 2,54 -47,05	CMYK 76 46 20 23
13		Munsell 5YR64	XYZ 62,13 59,10 47,14	xy 0,3690 0,3510	RGB 233 193 162	CIE Lab 81,35 9,83 20,63	CMYK 8 24 36 0
14		Munsell 5GY44	XYZ 9,91 12,00 6,10	xy 0,3538 0,4284	RGB 89 102 59	CIE Lab 41,22 -13,73 24,19	CMYK 25 19 36 39

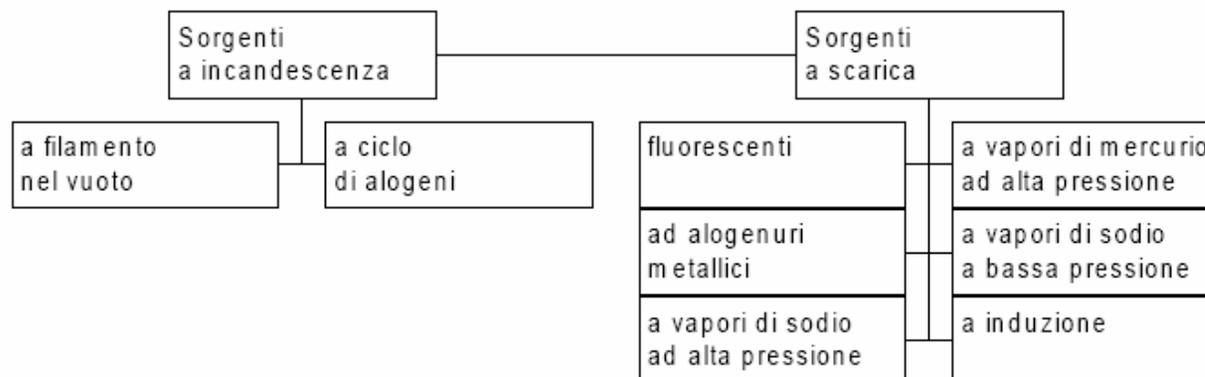


2. Le sorgenti Luminose



2. Le sorgenti Luminose

Tipi di Lampade



Tipo di lampada	Vita media (ore)	Temperatura di Colore (° Kelvin)	Indice di resa cromatica	Efficienza Luminosa (Lm/W)
Incandescente Standard	1000	2854	100	14
Alogena	2000	3000	100	20
Fluorescente tubolare	12000-15000	2700-6000	49-95	49-89
Fluorescente compatta	5000-6000	2700-6000	80-90	30-80
Alogenuri metallici	6000-20000	4000-5600	65-92	38-86
Vapori Hg fluorescente	10000-12000	3000-4200	35-60	30-60
Mercurio luce miscelata	6000-8000	3100-4200	40-75	Max 32
Sodio alta pressione	12000	2000-2500	20-80	Max 120
Sodio bassa pressione	10000-12000	2000	0	100-200
Induzione	60000	2700-3000-4000	80	70
LED bianco(1)	50000	6500	80	22

2. Le sorgenti Luminose

Caratteristiche di alcuni tipi di Lampade

Lampada	CCT (K)	R_a	X	Y
Alogena	3190	100	0,424	0,399
Fluorescente bianco freddo	4250	62	0,373	0,385
Fluorescente bianco caldo	3020	52	0,436	0,406
Fluorescente De Luxe bianco freddo	4050	89	0,376	0,368
Fluorescente De Luxe bianco caldo	2940	73	0,440	0,403
Fluorescente luce diurna	6250	74	0,316	0,345
Vapori di mercurio	5710	15	0,326	0,390
Vapori di mercurio corretti	4430	32	0,373	0,415
Vapori di mercurio con alogenuri	3720	60	0,396	0,390
Sodio alta pressione	2100	21	0,519	0,418

In merito agli indici di resa cromatica IRC di ambienti interni si può dire:

- ✚ IRC 85-100 resa cromatica ottima
- ✚ IRC 70-85 resa cromatica buona
- ✚ IRC 50-70 resa cromatica accettabile



Parametri caratteristici di una lampada

- ❑ **flusso luminoso (lm)**, ossia quantità di luce erogata per unità di tempo
- ❑ **efficienza luminosa (lm/W)**, come resa energetica di un lampada in termini di flusso per unità di potenza elettrica somministrata
- ❑ **dimensioni fisiche e forma** (per alcune applicazioni e tipologie di apparecchi)
- ❑ **tempo di accensione e riaccensione** (nelle lampade a scarica, in alcuni casi può anche essere di molti minuti)
- ❑ **temperatura di colore e resa cromatica**
- ❑ **durata** (valutata in condizioni di riferimento per la prova e su lotti omogenei di produzione) in termini di:
 - vita media in ore di funzionamento dopo il quale in un lotto di lampade il 50% smette di funzionare a determinate condizioni di prova
 - vita economica ore di funzionamento dopo il quale il livello di illuminamento è sceso del 30%
 - curva di mortalità in % al variare delle ore di funzionamento
 - curva di decadimento in % in funzione del flusso residuo al variare delle ore di funzionamento