

INDICE

1. Introduzione	1
2. Teoria del colore	3
2.1. Cenni storici.....	3
2.2. Colore e luce.....	5
2.3. La progettazione e gli effetti psicologici del colore.....	8
3. Grandezze fotometriche	10
3.1. Intensità luminosa.....	10
3.2. Flusso luminoso.....	11
3.3. Illuminamento.....	12
3.4. Luminanza.....	14
4. Sorgenti luminose	16
4.1. Grandezze caratteristiche.....	16
4.1.1. Efficienza luminosa.....	17
4.1.2. Temperature di colore.....	18
4.1.3. Resa del colore.....	20
4.1.4. Alimentatore.....	21
4.1.5. Regolazione del flusso.....	35
4.1.6. Vita media e decadimento del flusso luminoso.....	38
4.2. Lampade ad incandescenza.....	42
4.2.1. Lampade ad alogeni.....	52
4.2.2. Lampade ad alogeni a riflettore incorporato.....	60
4.2.3. Lampade fotografiche a lampo.....	62
4.3. Lampade a scarica.....	64
4.3.1. Lampade fluorescenti.....	69
4.3.2. Lampade a vapori di mercurio.....	76
4.3.3. Lampade a vapori di alogenuri.....	79
4.3.4. Lampade a luce miscelata.....	81
4.3.5. Lampade a vapori di sodio a bassa pressione.....	82
4.3.6. Lampade a vapori sodio ad alta pressione.....	84

4.3.7. Lampade ad arco.....	90
4.4. Lampade ad induzione.....	93
4.5. Led e laser.....	94
5. Bibliografia	100

Introduzione

Per dirla come lo psicologo Ruggero Pierantoni: "La sorpresa del poter vedere è quella che, nell'uomo comune, si rinnova a ogni apertura di palpebre". La questione inesauribile del come e perché la visione avviene a colori si basa forse sul fatto che l'elemento colore conferisce agli oggetti una dimensione supplementare, un valore di qualità, tale da rendere più ricco di contenuti informativi il rapporto con essi. Proprio per questa sua grande importanza, la percezione del colore è stata da sempre oggetto di studi da parte di ogni genere di artisti, poeti, filosofi, psicologi e, naturalmente, chimici, fisici e matematici. E lo è tuttora, tanti sono i dettagli, a livello della nostra percezione fisio-psicologica, rimasti in parte da chiarire. Quello che si ritiene di conoscere in modo alquanto definitivo, fatte salve nuove concezioni scientifiche, è l'aspetto fisico, oggettivo, del veicolo luminoso. Cosa nota, infatti, è la natura della luce che perviene al nostro occhio, ovvero energia elettromagnetica generata da sorgenti, oppure riflessa passivamente, nel caso di oggetti non luminosi, a causa di meccanismi di interazione luce-elettroni. Questa doverosa introduzione trova la sua ragione di essere nel fatto che sarebbe stato impensabile parlare di sorgenti luminose senza accennare a quello che poi è il prodotto, il fine ultimo di queste: la luce, il colore. Detto questo, passiamo all'argomento principe di questa tesi. Sarà una trattazione panoramica della casistica delle sorgenti di luce utilizzate usualmente nell'illuminotecnica, guardando i prodotti presenti sul mercato e distinguendone i principi di funzionamento ed i vari campi di impiego. E' stato possibile verificare quali fossero i prodotti presenti sul mercato avvalendosi dell'aiuto del catalogo di produzione (scaricato direttamente dal web) della OSRAM, una delle ditte più importanti del settore in questione. E' stato però doveroso precedere detta ingegneristica trattazione, con una presentazione sulla teoria del colore e su tutti gli aspetti fisio-psicologici che sono legati alla luce. E' infatti noto che la "progettazione del colore" è fondamentale per una corretta progettazione di un impianto di illuminazione. Saranno quindi analizzati brevemente i rapporti che intercorrono tra colore e persona in relazione ai vari campi di utilizzo del "vettore luce". Seguirà

anche una presentazione delle grandezze fotometriche usualmente utilizzate in illuminotecnica, che saranno di aiuto nel comprendere i data-sheets dei produttori di sorgenti luminose.

Capitolo 2

Teoria del colore

2.1 Cenni storici

L'occhio umano è in grado di percepire l'esistenza degli oggetti e le loro relazioni spaziali grazie alla luce che raccoglie. Inoltre, riceve uno stimolo che genera la sensazione di colore che dipende dalla lunghezza d'onda della luce emessa o riflessa dalle superfici degli oggetti. Non è possibile dare una definizione più precisa, poiché la visione del colore deriva da un processo molto complesso in cui i fattori fisiologici e psicologici si sovrappongono in maniera determinante a fattori fisici. Sicuro è che l'occhio umano percepisce radiazioni elettromagnetiche aventi lunghezze d'onda λ comprese tra 380 nm e 780 nm, regione dello spettro corrispondente alla luce visibile. L'unico elemento che differenzia questo intervallo dello spettro elettromagnetico è appunto la capacità delle radiazioni in esso comprese (dette radiazioni visibili) di stimolare la retina dell'occhio umano in modo da produrre nel cervello sensazioni visive. Generalmente al nostro occhio giunge luce composta da un certo insieme di lunghezze d'onda non separate tra loro.

Sulla natura del colore si è discusso per parecchi secoli. Si è pensato che il colore fosse attaccato ai corpi e se ne è addirittura ipotizzata un'esistenza soggettiva. Tutt'oggi il problema resta ancora pieno di interrogativi. Comunque, chi ha pensato al colore come a qualcosa di oggettivo, non ha certamente visto giusto. Tra le ipotesi di coloro che se ne sono occupati, appare particolarmente significativa quella di Padre Grimaldi che considerò i colori come "modificazioni" dei raggi luminosi. Tali raggi, secondo lo studioso, non procederebbero in linea retta, ma in maniera sinuosa. In tal modo, i diversi colori non sarebbero altro che risposte psicologiche diverse alla penetrazione nell'occhio di raggi aventi sinuosità di varia frequenza.

Anche Newton diede il suo contributo alla causa. Effettuando, infatti, un particolare esperimento scoprì che nel momento in cui un raggio di luce bianca attraversa un prisma trasparente, la luce si scinde in tutte le sue componenti cromatiche (rosso, arancione, giallo, verde, blu, indaco, violetto) e ciascuna di esse subisce una deviazione differente. In particolare, si poteva osservare come il rosso deviasse molto meno del violetto, mentre gli altri colori avessero un comportamento intermedio (figura 2.1).

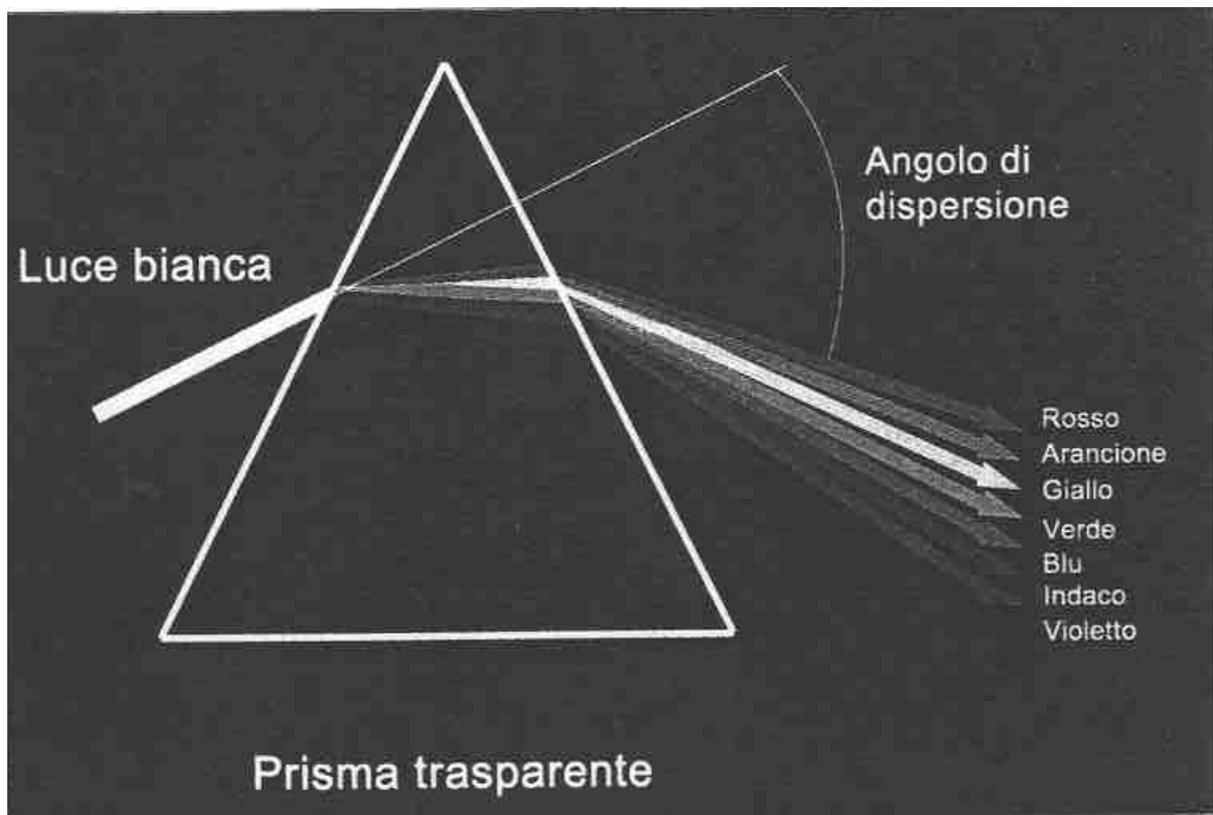


figura 2.1

Newton individuò quindi sette colori base: tutte le altre variazioni cromatiche potevano essere considerate una particolare miscela dei sette. In base a quanto sappiamo oggi sulla natura della luce, in pratica ogni colore subisce una deviazione tanto maggiore quanto minore è la lunghezza d'onda che lo caratterizza (e quindi maggiore la frequenza, maggiore sarà la deviazione).

Come Padre Grimaldi, Newton tenne a sottolineare il carattere soggettivo dei colori. I raggi non sono colorati e quando si parla di un raggio rosso lo si fa per

essere compresi da tutti. Nei primi decenni del XX secolo, si affermò la teoria ondulatoria della luce. Non fu difficile ipotizzare che i diversi colori corrispondessero a radiazioni di lunghezza d'onda differente. In seguito Young (1801) ipotizzò che la retina contenesse tre tipi di recettori (rosso, verde, violetto). Egli giunse alla conclusione secondo la quale tutti i colori spettrali possono essere prodotti attraverso la combinazione dei tre primari: era la nascita della colorimetria tricromatica. Ma la teoria tricromatica non spiega in modo esauriente la percezione dei singoli colori, in particolare del giallo. Una seconda teoria sulla visione del colore, adottata ancora oggi, è la teoria dei *colori opposti* formulata da Hering nel 1878. Questa teoria assume sei colori base (rosso, giallo, verde, blu, bianco, nero) che interagiscono a coppie e non separatamente. Anche questa teoria, però, non riesce a spiegare tutti i fenomeni connessi alla visione dei colori. Attualmente le due teorie sono state affinate e si ritiene che siano necessarie entrambe per una completa descrizione del processo della visione dei colori.

2.2 Colore e luce

Come già accennato in precedenza, ad ogni determinata composizione spettrale della luce (proveniente da una sorgente primaria o riflessa da un oggetto) corrisponde un colore ben definito. Gli attributi di un colore (dalle specifiche della Commissione Internazionale dell'Illuminazione o C.I.E. ,secondo le iniziali francesi della commissione) sono tre:

<u>Termine percettivo</u>	<u>Termine usato in colorimetria</u>
Tinta	Lunghezza d'onda dominante
Brillantezza (sorgenti primarie)	Luminosità
Saturazione	Purezza

- *Tinta* (o lunghezza d'onda dominante): è la sensazione percepita che dà il nome al colore, ad esempio: rosso, verde, porpora, giallo, ecc. Quando la luce è composta da un insieme di lunghezze d'onda, la tinta in genere corrisponde a quella di una opportuna lunghezza d'onda detta dominante. In sintesi, è quella che fa distinguere all'uomo il rosso, il giallo, il verde, ecc. I colori che possiedono una tinta sono detti cromatici. Sono, invece, acromatici il bianco, il nero e tutti i grigi.
- *Brillantezza* (o luminosità): sintetizza la nozione acromatica di intensità percepita da una sorgente primaria di luce (o da un oggetto riflettente).
- *Saturazione* (o purezza): indica la concentrazione della tinta rispetto al contenuto di bianco. Varia da valori prossimi allo 0% (nel caso di colori molto pallidi), fino al 100% , limite in cui il colore coincide con la componente cromatica pura. La saturazione di un colore è, dunque, una proporzione tra la componente cromatica pura della lunghezza d'onda dominante e la luce bianca necessaria per ottenere tale colore. Ogni colore è considerato come miscela di un colore puro o spettrale, o “saturo”, e di una certa dose di “bianco” che ne attenua la saturazione. La saturazione del bianco e dei grigi è pari allo 0% .

Il colore non è un attributo fisico di un oggetto. Quando l'energia luminosa colpisce i fotoricettori dell'occhio umano, il cervello identifica la sensazione come colore. Un oggetto non ha, quindi, un unico colore caratteristico: il suo aspetto varia in funzione della luce che riceve (intensità, composizione spettrale).

Il colore dei corpi può, dunque, essere considerato come una percezione sensoriale dovuta ad un insieme di fattori soggettivi e oggettivi connessi alla proprietà del materiale, alla natura delle sorgenti luminose, agli effetti di contrasto e alla risposta fisiologica dei fotoricettori dell'organo visivo.

Si utilizzano numerosi metodi per descrivere il colore di una sorgente o di un oggetto. Tutti sono basati su tre informazioni. Nel sistema CIE, il colore è espresso in termini di tre valori tristimolo o, in alternativa, in termini di due coordinate cromatiche e di una misura di luminanza. Il risultato è un diagramma cromatico sul quale possono

essere fissate le coordinate di un determinato colore. Gli altri sistemi sono di tipo soggettivo, maggiormente collegati all'impressione visiva. Due sistemi molto usati, basati sull'apparenza del colore, sono il sistema Munsell e il sistema DIN. Nell'atlante di Munsell i colori sono descritti in termini di tinta, valore (luminosità) e croma (saturazione). Le possibili combinazioni di tinta, valore e croma sono rappresentate in un grafico a tre dimensioni (figura 2.2).

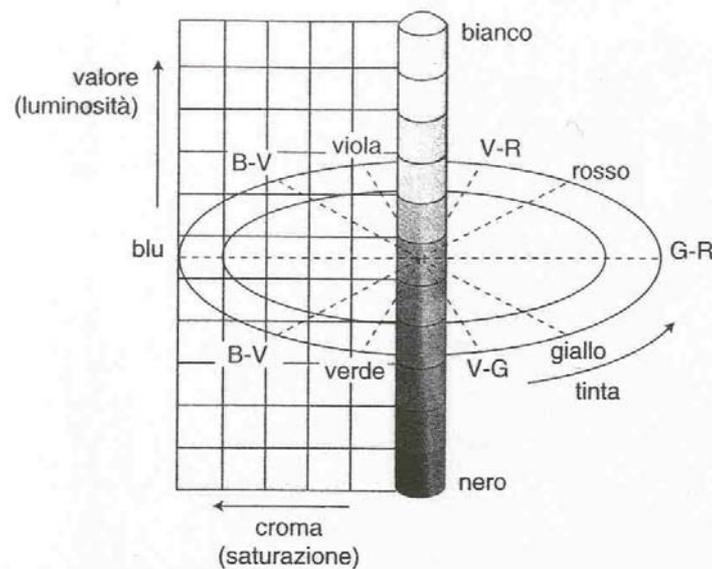


figura 2.2

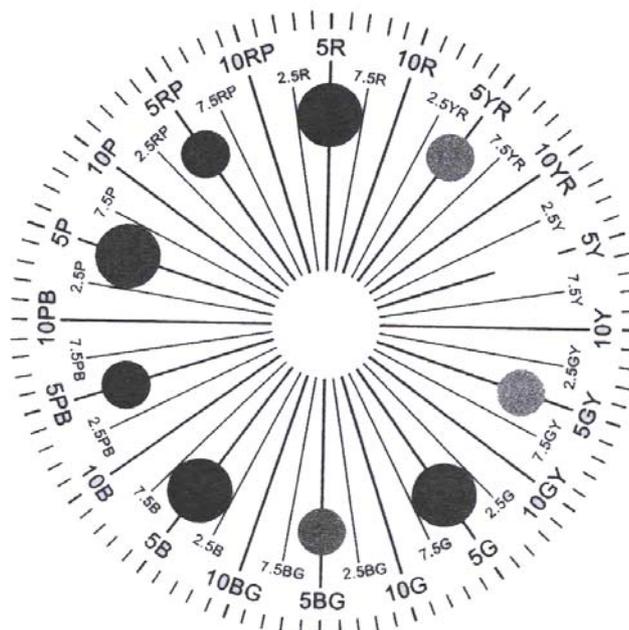


figura 2.3 (L'atlante di Munsell)

2.3 La progettazione e gli effetti psicologici del colore

L'idea che il colore abbia qualche effetto sulla salute dell'uomo è argomento molto diffuso nella storia della medicina. Nel nostro secolo si sono registrati numerosi tentativi di far uso del colore nella terapia o nella diagnosi in campo psichiatrico. Le ricerche effettuate dimostrano, infatti, l'esistenza di risposte fisiologiche ai colori. Nel 1910, Stein dimostrò che, in risposta alla luce, il tono muscolare globale dell'organismo umano cambia più o meno sensibilmente. Successivamente, Ferè ha integrato quanto sostenuto da Stein dimostrando che la struttura muscolare risponde in modo differente, oltre che alla luce, anche al colore. Ad esempio, il rosso produceva il maggior aumento del tono muscolare, mentre tale effetto diminuiva gradualmente al variare della lunghezza d'onda, raggiungendo il minimo con la luce di colore blu. Agli inizi degli anni sessanta, negli Stati Uniti si diffuse la "cinesiologia applicata". Si trattava, in pratica, della misurazione dei cambiamenti transitori della forza muscolare generale, che si avvertono quasi istantaneamente in seguito all'esposizione a stimoli di diversa natura, tra cui anche la composizione spettrale della luce. Ad esempio, se si osserva un campo colorato in piena luce, la forza muscolare diminuisce immediatamente e tale effetto è più evidente in corrispondenza dell'estremo rosso dello spettro e in minore misura rispetto al blu. Il bianco ha, invece, la proprietà di non influenzare la forza muscolare, rivelandosi, quindi, "colore neutro". Studi più recenti hanno correlato, nella funzionalità respiratoria, un minore consumo di ossigeno per ambienti di colore scuro che a mano a mano aumenta quanto più ci si avvicina alle tonalità del rosso. Infine ambienti troppo colorati (per luminosità e diversità cromatica) causano all'occhio stanchezza visiva. Basta comunque l'esperienza quotidiana per verificare che la luce, ma soprattutto il colore, influenzano lo stato d'animo. Quindi appare chiaro che, lo studio dei colori, in aggiunta ad un'illuminazione adeguata, crea quindi le condizioni favorevoli alla salute, alla sicurezza e al benessere psicofisico dell'utente. Il colore non deve essere pensato come esclusivo elemento decorativo: ricopre un ruolo attivo nella percezione e sulla psicologia dell'uomo, agendo direttamente sul sistema

nervoso e predisponendo l'organismo a una maggiore o minore condizione di comfort fisico. Si possono riportare alcuni esempi di casi in cui il colore è stato scelto con il preciso intento di risultare il più adeguato possibile rispetto all'ambiente considerato. Per esempio le pareti azzurre negli ospedali dove si trovano soggetti sottoposti a tensioni emotive, hanno un effetto calmante. Alcune sfumature di giallo possono provocare nausea e sono pertanto evitate nella costruzione degli arredi degli aerei. Particolari sfumature sono invece state usate con successo nelle aule per aumentare il rendimento degli alunni. Quando l'occhio è esposto a un colore saturo, il canale maggiormente stimolato si affatica e la sensazione percepita si sposta verso il colore complementare del canale (stimolo) affaticato: per evitare ciò il camice dei chirurghi è verde, in modo che una continua vista del sangue possa essere compensata con un complementare altrettanto saturo. In un ambiente di lavoro è preferibile usare colori con un buon fattore di riflessione sia per il risparmio energetico che ne consegue, sia per incrementare la componente di luce indiretta e, quindi, addolcire le ombre generate dall'illuminazione diretta, sia essa naturale o artificiale. Estremamente incisivo è, per esempio, il ruolo che la luce e il cromatismo di un'aula scolastica esercitano sui processi di apprendimento degli studenti oltre che sulle loro capacità creative e intellettuali.

Capitolo 3

Grandezze fotometriche

3.1 Intensità luminosa

È una grandezza vettoriale di simbolo I . Ha come unità di misura la *candela*(cd). La candela è l'unità di misura fondamentale del sistema fotometrico. L'intensità luminosa esprime la concentrazione di luce in una direzione specifica, radiata per secondo. Essa può essere definita come flusso luminoso radiato in una certa direzione per unità di angolo solido (vedi fig 3.1). L'intensità luminosa emessa in ogni direzione da una sorgente luminosa, la cui distribuzione sia uniforme in tutte le direzioni, è uguale al rapporto tra il flusso luminoso e 4π (che è l'angolo solido che comprende tutto lo spazio attorno ad un punto). La relazione fondamentale è

$$I = E \cdot D^2$$

in cui : D = distanza in metri fra la sorgente e la superficie illuminata;

E = illuminamento in lux

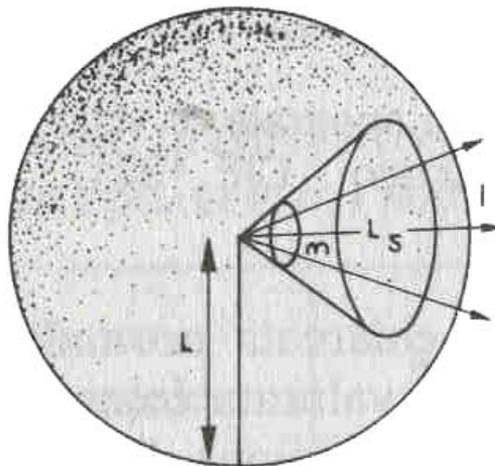


figura 3.1

3.2 Flusso luminoso

E' una grandezza scalare di simbolo ϕ . L'unità di misura è il *lumen* (lm) e corrisponde al flusso luminoso emesso entro l'angolo solido unitario da una sorgente puntiforme avente un'intensità luminosa di una candela. La relazione fondamentale è

$$\phi = E \cdot A$$

in cui: E = illuminamento (lux)

A = superficie in m²

Il flusso luminoso è un flusso energetico "pesato" secondo la sensibilità spettrale dell'occhio umano: l'occhio, infatti, tramuta in sensazione visiva le radiazioni che lo colpiscono, con intensità proporzionale alla sua sensibilità, rappresentata dalla curva di figura 3.2 :

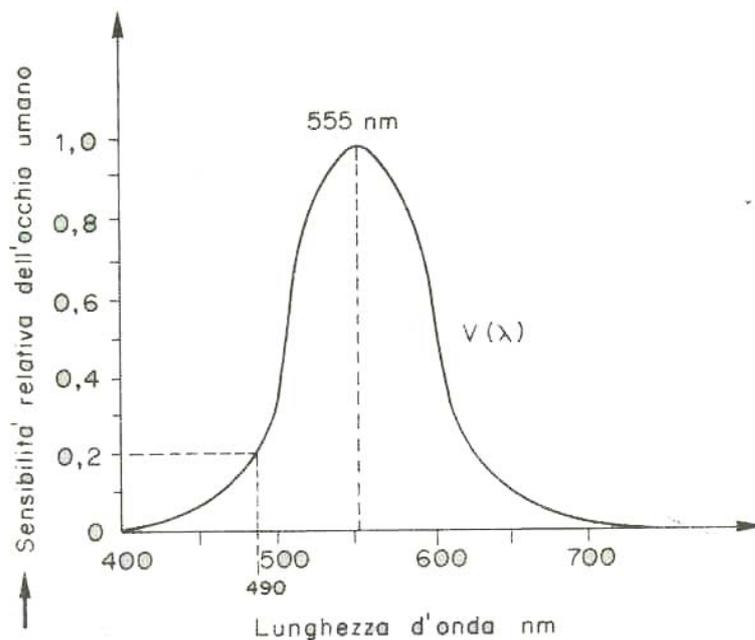


figura 3.2

La curva in figura, chiamata normalmente $V(\lambda)$, è stata valutata come media delle risposte ottenute da un campione di osservatori in condizioni di luminosità superiori ad un certo minimo (visione fotopica). La massima sensibilità dell'occhio, nelle suddette condizioni, si ha in corrispondenza dei 555 nm: un watt di potenza radiante con questa lunghezza d'onda equivale ad un flusso luminoso di 683 lm. Un watt di

potenza radiante con diversa lunghezza d'onda da luogo quindi ad un flusso luminoso minore. Ad esempio a 490 nm, dove la sensibilità dell'occhio è 0.2 , fatta uguale a 1 quella a 555 nm (vedi figura 3.2), il flusso luminoso corrispondente è $0.2 \cdot 683 = 137$ lm . Al di sotto di 380 nm e al di sopra di 760 nm la sensibilità dell'occhio è nulla, e pertanto nullo il flusso luminoso prodotto dalle radiazioni di dette lunghezze d'onda.

3.3 Illuminamento

E' una grandezza scalare di simbolo E. E' il flusso luminoso incidente su una superficie di area unitaria. Unità di misura è il *lux* (lm/m²) e corrisponde all'illuminamento prodotto da un flusso di 1 lumen distribuito in modo uniforme su una superficie di 1 m² (figura 3.3) :

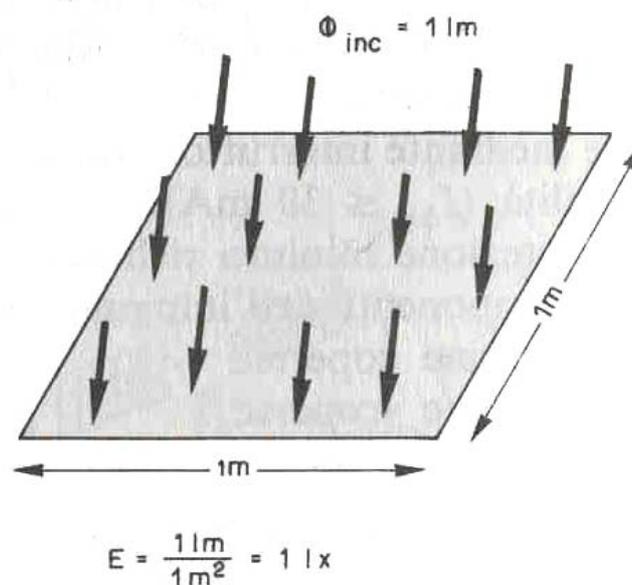


figura 3.3

La relazione fondamentale è : l'illuminamento è inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Se la superficie è perpendicolare alla direzione dei raggi luminosi : $E = I / D^2$

Se invece la superficie è inclinata si ha: $E = (I \cdot \cos \theta) / D^2$

dove θ = angolo di incidenza, compreso tra la direzione dei raggi luminosi e la normale alla superficie. In realtà questa legge è valida solo per sorgenti puntiformi.

Nella pratica, comunque, essa può ritenersi valida, con buona approssimazione, quando la distanza tra la sorgente e il punto in questione è almeno 5 volte più grande della dimensione maggiore della sorgente.

Inoltre detti ϕ = flusso incidente su una data superficie e A = area in m^2 :

$$E = \frac{\phi}{A}$$

L'illuminamento medio prodotto su una superficie risulta essere la media dei valori che l'illuminamento assume nei vari punti della superficie e cioè :

$$E_{medio} = \sum_{i=1}^n \frac{E_{p_i}}{n} = \frac{E_{p_1} + E_{p_2} + \dots + E_{p_n}}{n}$$

Ad esempio un campo di calcio il cui illuminamento orizzontale medio sia 500 lux su un'area di $68 \cdot 105 = 7140 m^2$, riceve un flusso luminoso di $500 \cdot 7140 = 3570000 lm$. Il flusso luminoso emesso dalle lampade che illuminano il campo deve essere superiore al suddetto valore, per tenere conto del flusso assorbito all'interno dei proiettori e di quello disperso al di fuori del campo di gioco.

Illuminamenti prescritti	
Tipo di attività/ambiente	Illuminamenti medi di esercizio
Spazio pubblico in contesto buio (all'aperto)	20-30-50 lux
Orientamento per brevi visite temporanee	50-100-150 lux
Spazio di lavoro all'interno del quale i compiti che richiedono l'impegno della vista sono svolti solo occasionalmente	100-150-200 lux
Esecuzione di lavori visivi su materiali: <ul style="list-style-type: none"> ■ Ad elevato contrasto o grandi dimensioni ■ A medio contrasto o piccole dimensioni ■ A basso contrasto o dimensioni molto piccole ■ A basso contrasto o dimensioni molto piccole per periodi di tempo prolungati 	200-300-500 lux 500-750-1000 lux 1000-1500-2000 lux 1500-2000-3000 lux
Svolgimento di lavori visivi impegnativi e prolungati (illuminazione localizzata)	5000-10000-15000 lux
Svolgimento di lavori visivi molto speciali eseguiti su materiale a basso contrasto e di piccole dimensioni (illuminazione localizzata)	10000-30000 lux e oltre

3.4 Luminanza

E' una grandezza vettoriale di simbolo L . L'unità di misura è cd/m^2 . La luminanza è il limite del rapporto fra l'intensità luminosa prodotta in una data direzione da un elemento di superficie e la proiezione dell'elemento di superficie su un piano normale alla direzione stessa. E' quindi una grandezza che dipende dalla posizione dell'osservatore. La luminanza è la grandezza fotometrica che stimola la percezione visiva e sarebbe perciò corretto riferirsi a questa grandezza nell'eseguire i calcoli fotometrici; essa è tuttavia difficile da determinare, essendo funzione dei fattori di riflessione dell'ambiente, che variano sia nel tempo che nello spazio. Per questo motivo si fa riferimento ai valori di illuminamento, di più facile misura e determinazione, che vengono raccomandati tenendo conto dei fattori di riflessione medi degli oggetti e superfici generalmente presenti negli ambienti delle diverse categorie. La luminanza di una superficie perfettamente diffondente è legata

all'illuminamento dalla seguente espressione :
$$L = \rho \frac{E}{\pi}$$

dove L è la luminanza, ρ è il fattore di riflessione diffusa, E l'illuminamento.

Luminanza di alcune sorgenti luminose

	cd/m ²
Tubo fluorescente da 40 W	7000÷15000
Cielo chiaro	4000
Candela comune	5000
Lampada al sodio a bassa pressione	20000
Lampada ad incandescenza da 40 W	$5 \cdot 10^6$
Lampada ad incandescenza da 100 W	$6 \cdot 10^6$
Lampada ad incandescenza da 1000 W	$12 \cdot 10^6$
Lampada a vapore di mercurio a media pressione	$3 \cdot 10^6 \div 10 \cdot 10^6$
Lampada a vapore di mercurio ad altissima pressione	$3 \div 17 \cdot 10^8$
Arco di carbone 100 A	$1.3 \cdot 10^8$
Sole	$1.65 \cdot 10^9$

Capitolo 4

Sorgenti luminose

4.1 Grandezze caratteristiche

Una prima distinzione delle sorgenti primarie può essere fatta tra sorgenti di luce artificiale e di luce naturale: la differenza non è comunque sostanziale, in quanto entrambe fanno capo alle stesse leggi chimiche e fisiche. Nella nostra trattazione sulle sorgenti luminose noi esamineremo nello specifico le lampade elettriche. Come noto, la lampada elettrica è una sorgente luminosa alimentata mediante energia elettrica e le principali grandezze che la caratterizzano sono la tensione di alimentazione, la potenza assorbita, l'intensità luminosa, il colore della luce emessa e l'efficienza luminosa. E' inoltre importante considerare il cosiddetto solido fotometrico, ossia la superficie che rappresenta il diagramma polare dell'intensità luminosa emessa nelle diverse direzioni. Intersecando il solido fotometrico con opportuni piani si ottengono le curve fotometriche, relative a tali piani, delle lampade (figura 4.1).

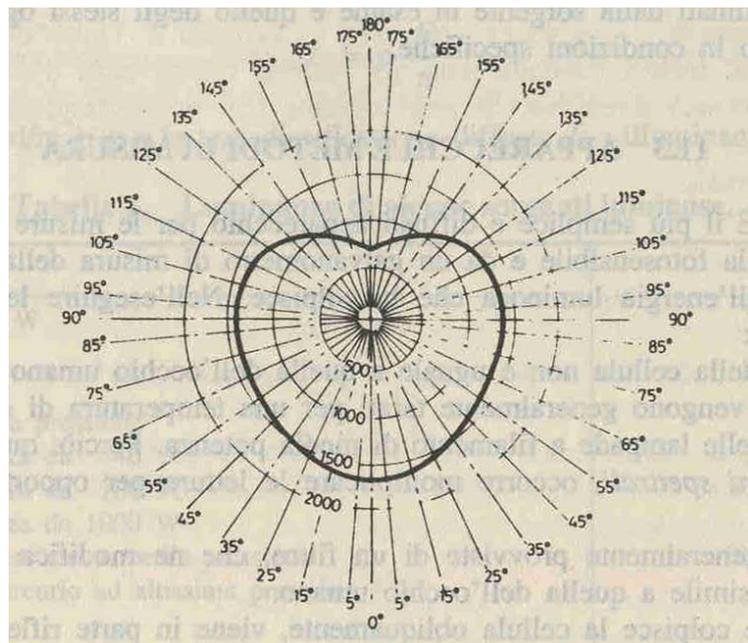


figura 4.1

Le curve fotometriche, generalmente, vengono tracciate in coordinate polari, salvo per gli apparecchi a fascio stretto le cui intensità sono rappresentate in coordinate cartesiane. Quando non intervengono riflessioni secondarie, l'illuminamento in un punto qualsiasi dello spazio (posto a distanza sufficiente affinché la sorgente possa considerarsi praticamente uniforme) viene determinato rilevando dal diagramma l'intensità in direzione del punto dato e dividendo per il quadrato della distanza del punto della sorgente.

Le sorgenti di luce artificiale moderne possono essere classificate seguendo diversi criteri ; poiché il più ragionevole, che probabilmente è quello che prende in considerazione la modalità di emissione della luce, presenterebbe l'inconveniente di stabilire confini incerti tra le diverse categorie, si preferisce far ricorso ad un criterio più grossolano fondato su caratteristiche tecnologiche e costruttive. In base a questo le sorgenti vengono correntemente suddivise nelle categorie delle lampade a incandescenza, delle lampade a scarica in aeriformi a bassa pressione, delle lampade a fluorescenza, lampade a scarica in aeriformi a media e alta pressione, lampade ad arco, sorgenti ad elettroluminescenza e delle sorgenti di tipo speciale. Vediamo ora quali sono le principali grandezze che caratterizzano le varie sorgenti luminose.

4.1.1 Efficienza luminosa

Il rapporto tra flusso luminoso emesso e potenza elettrica assorbita è detto *efficienza luminosa* ed è espresso in lm/w . La quantità di flusso luminoso è legata alla radiazione energetica emessa secondo quanto stabilito dalla curva di visibilità dell'osservatore fotometrico focalizzato C.I.E. che definisce la sensibilità relativa dell'occhio umano (curva $V(\lambda)$) in funzione della distribuzione spettrale energetica. In pratica, quindi, i lumen sono Watt visibili. Una sorgente radiante con una potenza costante di 1 W per ogni intervallo di dette radiazioni comprese nella gamma visibile, produrrebbe un flusso luminoso dato dal prodotto di 683 per la media della curva $V(\lambda)$ di figura 3.2 : tale prodotto è all'incirca uguale a 220 lm. Mentre il valore di 683 lm/w ricordato è

il valore limite teorico dell'efficienza di una sorgente luminosa che emette una radiazione concentrata soltanto sulla lunghezza d'onda dove è massima la sensibilità dell'occhio umano e corrisponde quindi ad una radiazione monocromatica ; essa come tale non è suscettibile di riprodurre tutta la gamma di colori. In pratica, le sorgenti luminose oggi disponibili hanno efficienze luminose molto inferiori ai suddetti limiti : tali efficienze variano da 8 a 19 lm/w delle comuni lampade ad incandescenza ad un massimo (per le sorgenti che emettono radiazioni distribuite almeno in buona parte nella gamma del visibile) di quasi 100 lm/w delle lampade a vapori di alogenuri. Per le sorgenti luminose con emissione praticamente monocromatica (quali le lampade al sodio a bassa pressione) l'efficienza luminosa è dell'ordine di 170 lm/w (tenuto conto delle perdite nell'alimentatore). Quindi l'efficienza luminosa dipende da 2 fattori :

- La percentuale di potenza elettrica che è realmente convertita in radiazioni visibili ;
- La distribuzione spettrale della radiazione in relazione alla curva di sensibilità spettrale dell'occhio umano.

Ai fini del calcolo dell'efficienza sono considerati solo i Watt elettrici assorbiti dalla lampada; le perdite provocate dall'eventuale presenza nel circuito di ausiliari elettrici non sono considerate. L'efficienza delle sorgenti luminose muta nel corso della loro vita: ciò significa che pur assorbendo la stessa potenza elettrica non viene più emessa la quantità nominale di flusso luminoso.

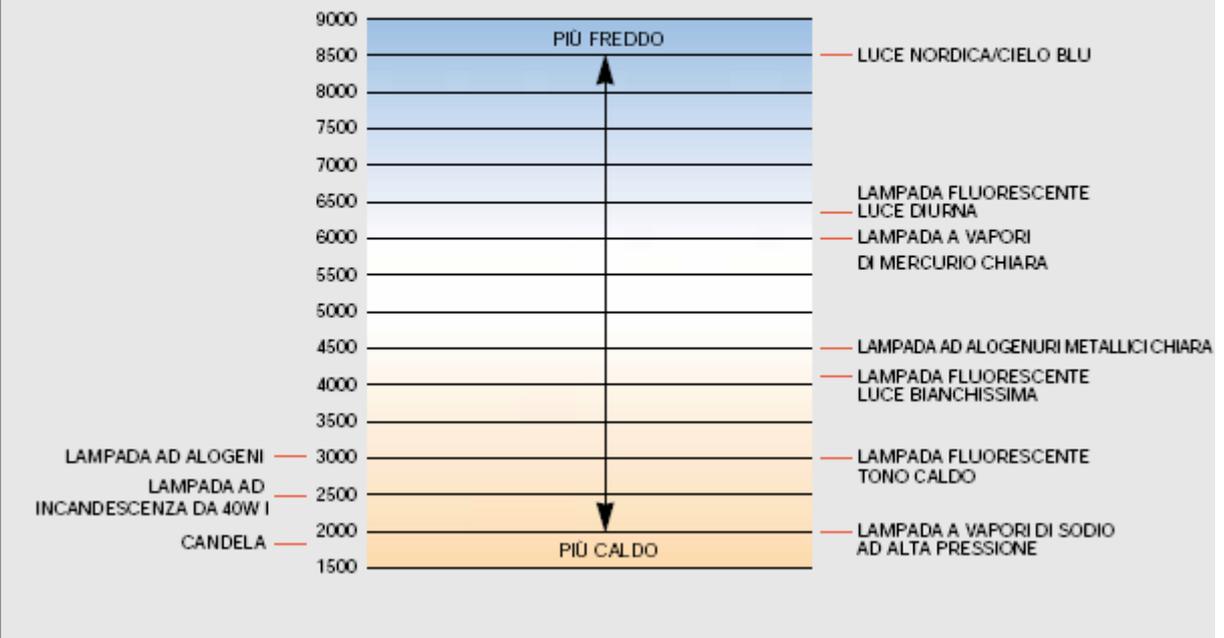
4.1.2 Temperatura di colore

Il colore associato a una data radiazione può essere determinato confrontandolo con quello della radiazione emessa da un corpo nero (radiatore termico ideale). Ciò significa che la temperatura in gradi Kelvin cui occorre portare il corpo nero, affinché emetta una luce di colore uguale a quello della luce emessa dalla sorgente in esame, rappresenta la “misura” di tale colore, ed è detta temperatura di colore della sorgente. Ogni sorgente luminosa può essere specificata per mezzo del parametro *temperatura di colore* , temperatura alla quale il corpo

nero emette una radiazione il cui colore associato corrisponde o è il più simile a quello della sorgente.

La scala delle temperature di colore correlate

L'apparenza cromatica delle varie sorgenti luminose può essere definita in termini di temperatura di colore misurata in gradi kelvin (K)



Queste fotografie simulano variazioni della temperatura di colore di sorgenti luminose fluorescenti e mostrano come questi cambiamenti influenzino il modo in cui gli oggetti ci appaiono.

Il corpo nero emette radiazioni in tutto il campo delle lunghezze d'onda che teoricamente si estende tra $\lambda=0$ a $\lambda \rightarrow \infty$. L'irradiazione integrale del corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta (legge di Stefan); risulta quindi chiaro che il radiatore utilizzato come sorgente di luce

deve raggiungere elevate temperature. Infatti se il radiatore termico non è portato ad una temperatura sufficientemente elevata, l'emissione di luce non si manifesta (figura 4.2).

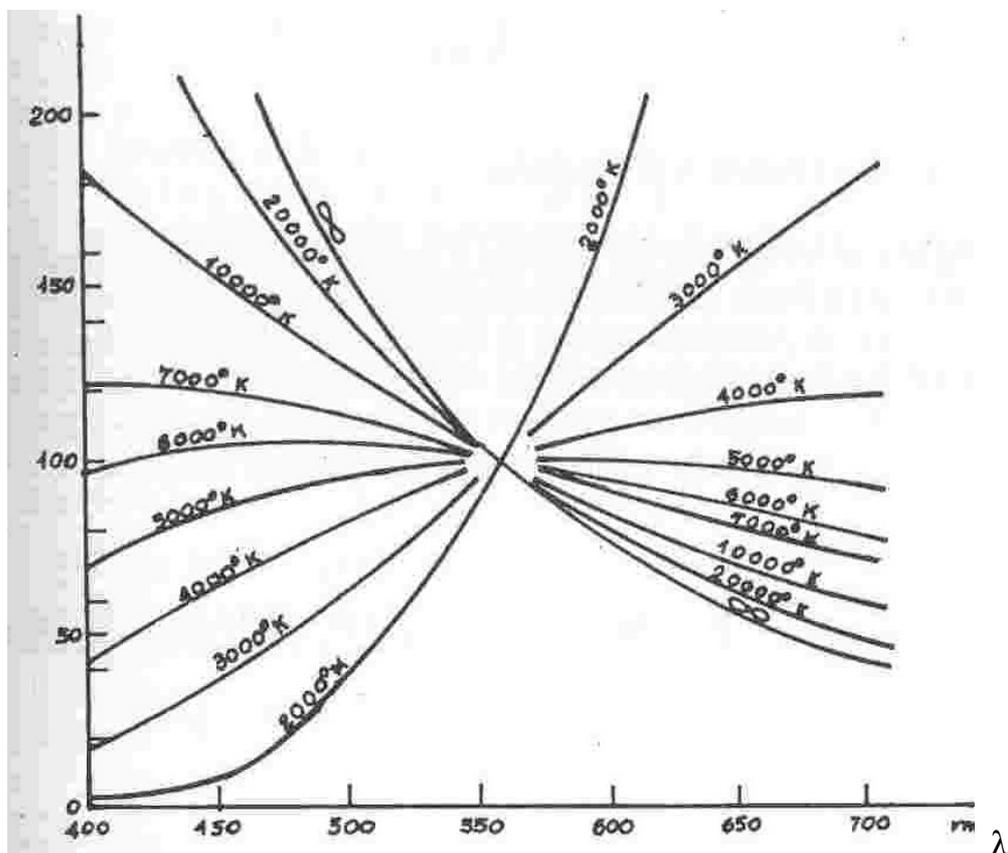


figura 4.2

4.1.3 Resa del colore

La resa del colore è un parametro che esprime l'attitudine che la sorgente ha nel rendere i colori degli oggetti da essa illuminati. Per valutare la qualità di resa cromatica di una sorgente luminosa si ricorre al metodo C.I.E. 1965. Esso consiste nel misurare come il colore di un certo numero di piastrelle campione varia passando dalla sorgente in prova a una di riferimento (sorgente campione). La comunità internazionale dei professionisti dell'illuminazione ha scelto 8 colori standard per la misura dell'indice di resa cromatica di una determinata sorgente luminosa. Le proprietà di resa cromatica sono espresse mediante un "indice generale di resa cromatica, Ra" il cui valore massimo è pari a 100. Si

noti che 2 sorgenti con uguali temperature di colore possono avere rese cromatiche diverse se le loro composizioni spettrali sono pure diverse.



Categorie di Resa dei colori

grado	indice Ra	Dove:
1A	>90	1- luce diurna (>5.000 °K) 2- luce bianchissima (4.000°K) 3- luce calda (<3.000°K)
1B	80<=Ra<=90	
2A	60<=Ra<80	
2B	40<=Ra<60	
3	20<=Ra<40	

4.1.4 Alimentatore

Il carico elettrico rappresentato dalla lampada, all'aumentare della tensione applicata, deve presentare una impedenza costante o crescente (questa situazione è denominata "caratteristica a resistenza positiva") altrimenti la corrente aumenterà fino a che il circuito si distruggerà. Per esempio, le lampade ad incandescenza hanno una caratteristica a resistenza positiva, mentre quelle a scarica hanno una caratteristica a resistenza negativa, dovuta all'effetto valanga che si manifesta sugli elettroni presenti nella scarica. In altri termini, in questo ultimo tipo di sorgente luminosa, una volta innescata la scarica elettrica fra i due

elettrodi della lampada, la resistenza costituita dalla colonna di gas frapposta tra i due elettrodi si riduce fortemente per l'avvenuta ionizzazione del gas. Quindi in assenza di un dispositivo limitatore della corrente si arriverebbe alla rapida distruzione della lampada. Per rendere possibile il funzionamento delle lampade a scarica, quindi, viene inserito in serie al circuito di lampada un apparecchio limitatore di corrente, detto alimentatore (o reattore, o ballast). Questo apparecchio può essere costituito da un reattore in ferro o da un alimentatore elettronico. Questo ultimo è generalmente del tipo ad alta frequenza, cioè che converte la tensione di alimentazione a frequenza di rete in una tensione ad alta frequenza. Hanno un impiego sempre crescente e sono costituiti da un circuito elettronico che genera una frequenza di alimentazione delle lampade di oltre 20 KHz. Il maggior costo iniziale è compensato dai vantaggi di bassissime perdite, soppressione dell'effetto stroboscopio, accensione istantanea e possibilità di regolazione del flusso luminoso. Le lampade da essi alimentate hanno un'efficienza di circa 100 lm/w con elevata resa cromatica. Sono presenti anche alimentatori del tipo a potenza costante. Questi apparecchi presentano notevoli vantaggi rispetto a quelli di tipo normale :

- I. la potenza assorbita si mantiene costante ed anzi all'avviamento è inferiore a quella di regime;
- II. viene eliminata la sovracorrente di avviamento;
- III. è assicurata l'accensione anche con variazione della tensione di alimentazione fino al 18÷20 % ;
- IV. è assicurata l'accensione anche con temperatura ambiente di -20°C ;
- V. il fattore di potenza è prossimo all'unità.

Spesso con il termine di *ausiliari elettrici ed elettronici* si intendono tutti quei dispositivi, incorporati o meno nella sorgente luminosa, chiamati a svolgere una o più delle seguenti funzioni : accensione e spegnimento, regolazione, mantenimento nel tempo della condizione voluta, modifica delle grandezze del circuito in rapporto alla rete elettrica di alimentazione. Alcune sorgenti, come ad

esempio le lampade a scarica, non sono in grado di funzionare senza specifici ausiliari elettrici; in altre, come le lampade ad incandescenza, gli ausiliari non sono indispensabili ma possono essere introdotti per assolvere le funzioni di accensione e spegnimento, di regolazione del flusso luminoso o di adattamento della tensione propria delle lampade a quella della rete. Analizziamo qualche schema di principio di ausiliario per lampada :

Ausiliari per lampade a scarica : induttori

Le lampade a scarica hanno in comune un processo d'arco elettrico in un ambiente gassoso. Per la stabilizzazione dell'arco e per la riduzione del valore della corrente a regime viene normalmente impiegata un'impedenza induttiva in serie all'arco stesso, secondo lo schema di figura 4.3 , elettricamente riconducibile allo schema di figura 4.4 , nel quale l'arco elettrico è stato sostituito con una resistenza variabile generalmente non lineare (R_L) :

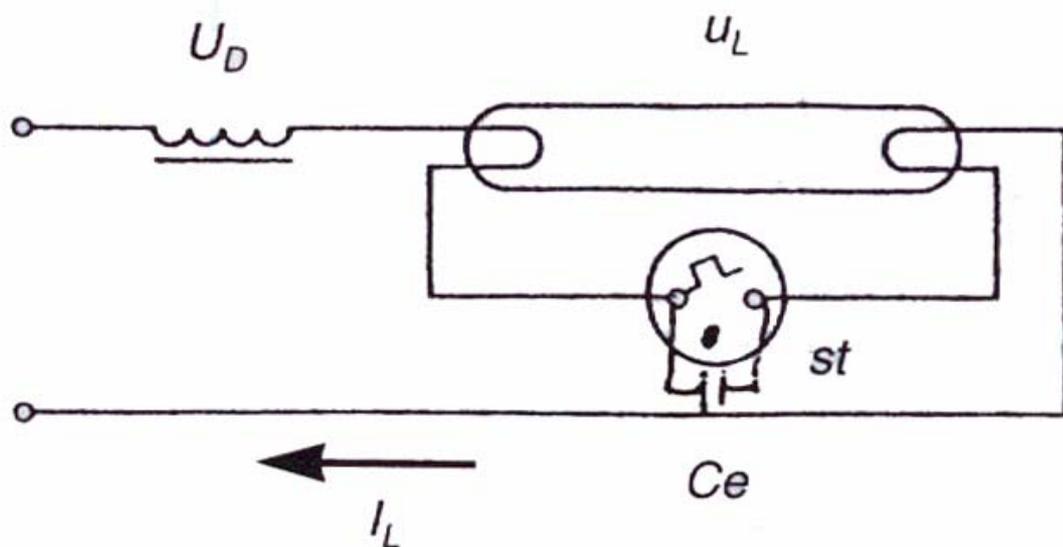


figura 4.3

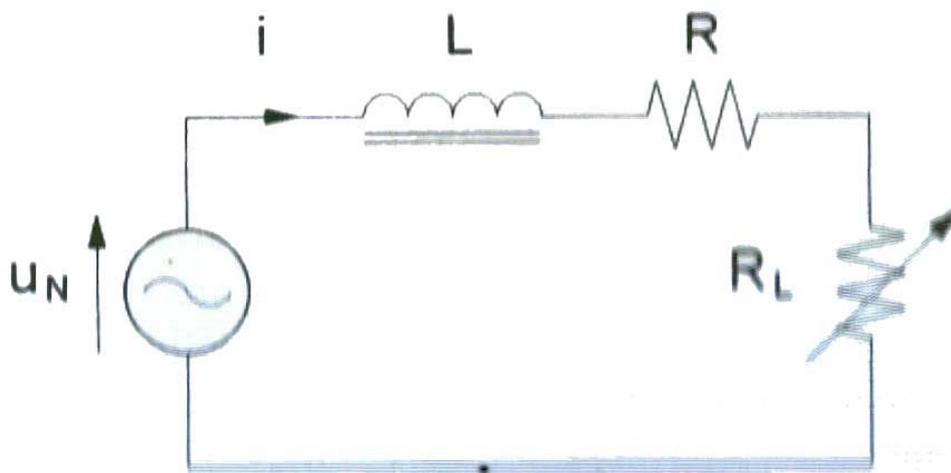


figura 4.4

Facendo un'analisi dell'equazione che regola il circuito, si possono individuare condizioni di *conduzione continua*, cioè con corrente diversa da zero nell'intero semiperiodo, o *discontinua*, quando tali condizioni non sono verificate. Quanto più il circuito è induttivo, tanto più è possibile avvicinarsi alla condizione di conduzione continua, come si può vedere, a titolo di esempio, in figura 4.5 .

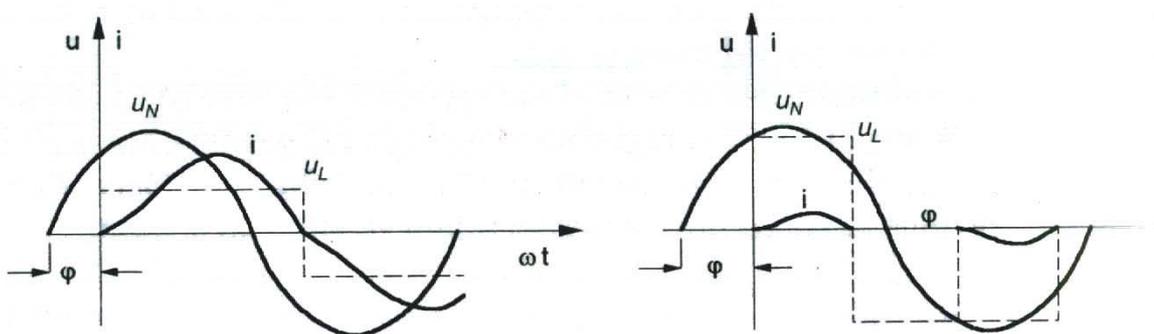


figura 4.5

La presenza dell'impedenza stabilizzatrice (denominata alimentatore o reattore della lampada) è dunque essenziale per la stabilità dell'arco oltre che per limitare l'ampiezza della corrente al valore desiderato al termine del processo di "primo innesco" dell'arco stesso (accensione della lampada).

Le lampade a scarica che impiegano induttori (*alimentatori magnetici*) per la stabilizzazione dell'arco hanno in comune l'utilizzo di questo componente ferromagnetico che, pur diversificandosi nella struttura e nella consistenza a seconda del tipo di sorgente luminosa (fluorescenza, vapori di sodio o mercurio, alogenuri), presenta alcune caratteristiche comuni riconducibili ad una delle seguenti tipologie:

- Induttore avvolto su un nucleo ferromagnetico provvisto di traferro;
- Trasformatore o autotrasformatore con nucleo ferromagnetico provvisto di tra ferro.

Nel primo caso la funzione svolta è quella di stabilizzare l'arco elettrico riducendo, a regime, la tensione di rete al valore richiesto dall'arco. Nel secondo caso, oltre alla funzione di stabilizzazione dell'arco, si provvede ad un adattamento della tensione nonché alla fornitura, tramite prese intermedie sull'avvolgimento secondario, di tensioni ausiliarie per l'alimentazione degli eventuali accenditori della sorgente luminosa.

Alimentatori capacitivi e resistivi per lampade a scarica

L'impedenza induttiva di figura 4.3 può essere sostituita, in linea di principio, da un'impedenza capacitiva (condensatore) per conseguire lo stesso risultato di stabilizzare l'arco e di limitare la corrente della lampada (figura 4.6).

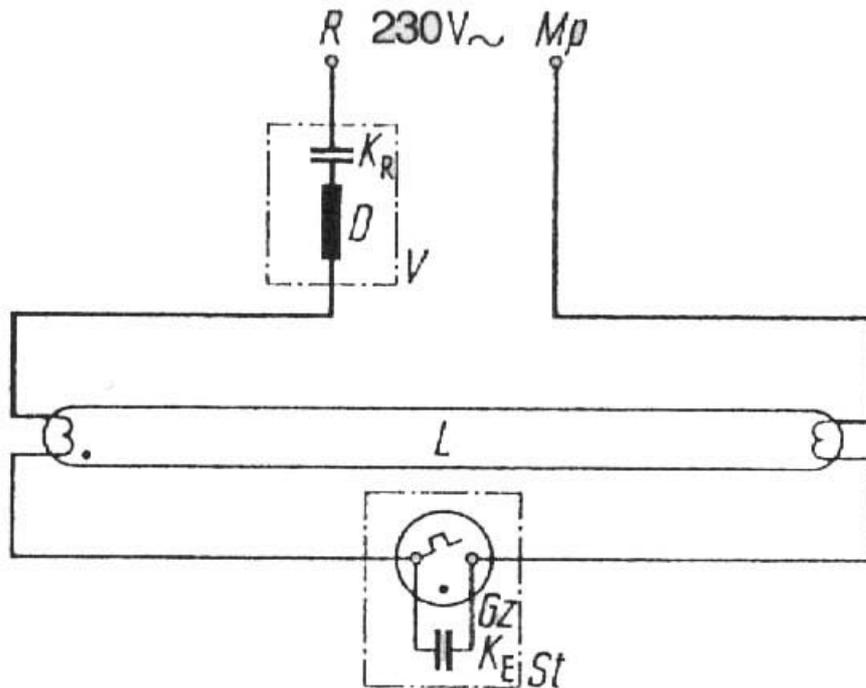


figura 4.6

In realtà, questo sistema presenta forti controindicazioni a causa degli elevati picchi di corrente a cui dà luogo, dovuti alla periodica carica e scarica del condensatore susseguente agli intervalli di non conduzione, con possibili *effetti flicker* visibili all'occhio. Il condensatore può inoltre dar luogo ad indesiderate risonanze ad alta frequenza con altri componenti della rete, fungendo da filtro per disturbi condotti o indotti. L'unico modo per utilizzare il condensatore è eventualmente quello di impiegare sistemi ibridi del tipo L-C o R-C . Una particolare applicazione di alimentatori capacitivi è quella di tipo "DUO" , disponibile per sole lampade fluorescenti da utilizzare sempre in coppia, in cui l'adozione di una coppia di circuiti, l'uno a caratteristica induttiva e l'altro a caratteristica capacitiva, alimentati dallo stesso punto della rete, consente di evitare i sistemi di rifasamento (figura 4.7).

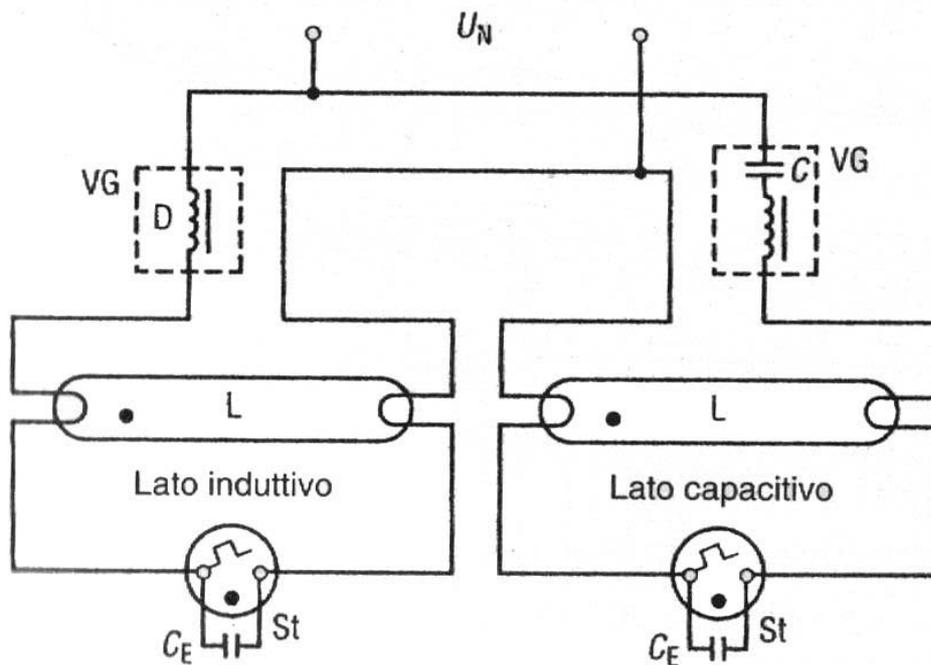


figura 4.7

Alimentatori con induttore e starter

Gli schemi circuitali sono quelli di figura 4.3 e 4.6, in cui compaiono l'induttore (o eventualmente anche il condensatore) in serie, gli elettrodi della lampada e il dispositivo di accensione (*starter*) collegato in parallelo agli elettrodi. L'accensione diretta della lampada a scarica richiede tensioni solitamente più elevate di quelle disponibili con le normali reti di alimentazione, in ogni caso più elevate della tensione necessaria a sostenere l'arco quando questo si è formato. A tal fine è utilizzabile lo starter (a bagliore o termico). Lo starter luminescente è il dispositivo di innesco per lampade fluorescenti più diffuso nel mondo, salvo che negli U.S.A. La sua funzione quella di aprire e chiudere il circuito di preriscaldamento di una lampada fluorescente allo scopo di innescare l'arco (figura 4.8):

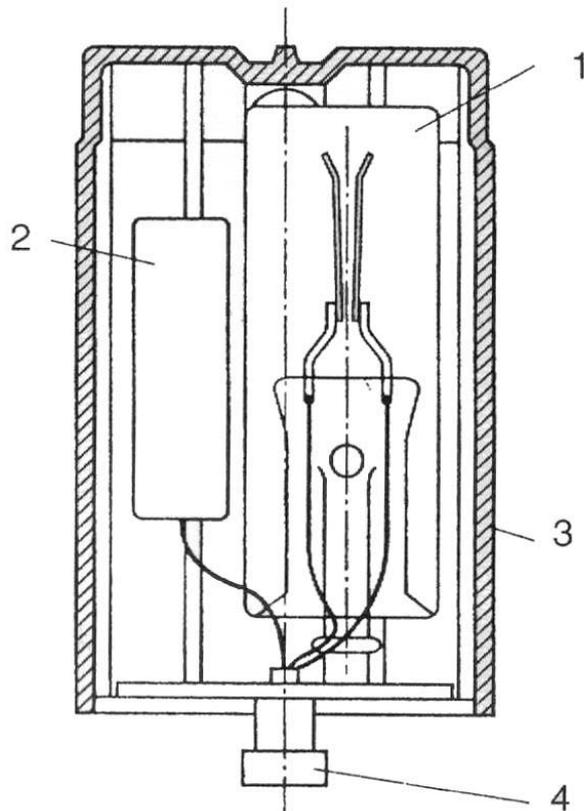


figura 4.8

1. “accenditore” luminescente;
2. condensatore antidisturbo;
3. involucro;
4. spinotti per fissaggio a “baionetta”

L'accenditore ha la stessa struttura di una piccola lampada ad arco in cui gli elettrodi sono costituiti da una coppia bimetallica. Alla chiusura del circuito di figura 4.3 la tensione di rete cade interamente sugli elettrodi della lampada e su quelli dell'accenditore. Essa non è però sufficiente ad innescare l'arco tra gli elettrodi ancora freddi della lampada mentre riesce ad innescare un piccolo arco elettrico tra gli elettrodi dell'accenditore, chiudendo in tal modo il circuito e consentendo all'elevata corrente di riscaldare gli elettrodi della lampada in modo da creare un “ambiente” adatto all'innescare dell'arco nell'intorno degli elettrodi stessi. La corrente continua a fluire nel contatto fisico tra i due elettrodi

bimetallici, deformatisi grazie all'energia messa in gioco dall'arco. Questa prima fase è seguita da un raffreddamento degli elettrodi dovuto all'assenza dell'arco; ciò provoca la riapertura degli elettrodi bimetallici accompagnata da una sovratensione transitoria normalmente sufficiente a innescare l'arco tra gli elettrodi principali della lampada, già riscaldati. Dopo l'accensione della lampada, ai capi dell'accenditore cade solo una quota della totale tensione di rete, insufficiente a reinnescare l'arco nell'accenditore. Qualora la lampada non si accenda al primo tentativo, il ciclo di riaccensione riparte automaticamente. La presenza del condensatore antidisturbo in parallelo all'accenditore influenza inoltre la forma stessa dell'impulso di tensione, introducendo componenti ad alta frequenza. Esistono anche gli *starter termici*. A differenza degli starter a bagliore funzionano con contatti normalmente chiusi con consumo di $0.5 \div 1.5$ W durante il funzionamento delle lampade. Garantiscono un'accensione più affidabile, specie alle basse temperature, ma hanno lo svantaggio di richiedere 4 morsetti, necessari per l'alimentazione della resistenza R di riscaldamento degli elettrodi bimetallici (figura 4.9).

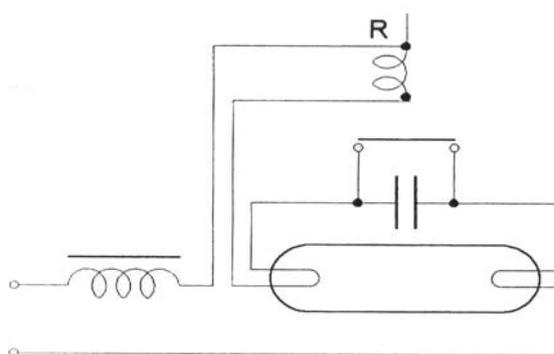


figura 4.9

Alimentatori per l'accensione "diretta" (senza starter)

Esistono vari sistemi di innesco d'arco nelle lampade fluorescenti senza ricorrere all'accenditore (starter); essi hanno in comune il riscaldamento continuo degli elettrodi che provoca una continua emissione elettronica

nell'intorno degli elettrodi stessi, e la presenza di accorgimenti atti a facilitare la propagazione della colonna d'arco da un elettrodo all'altro. I principali sistemi utilizzati sono:

Circuito con "Rapid Start" (circuito RS)

Il circuito è quello di figura 4.10 . Il trasformatore H alimenta continuamente gli elettrodi provvedendo a riscaldarli, sfruttando la loro emissione elettronica. Il tubo di scarica è ad alto isolamento ma è munito di un ausiliario d'innesco esterno costituito da una bandella conduttrice applicata esternamente o da un rivestimento conduttore applicato all'interno del tubo.

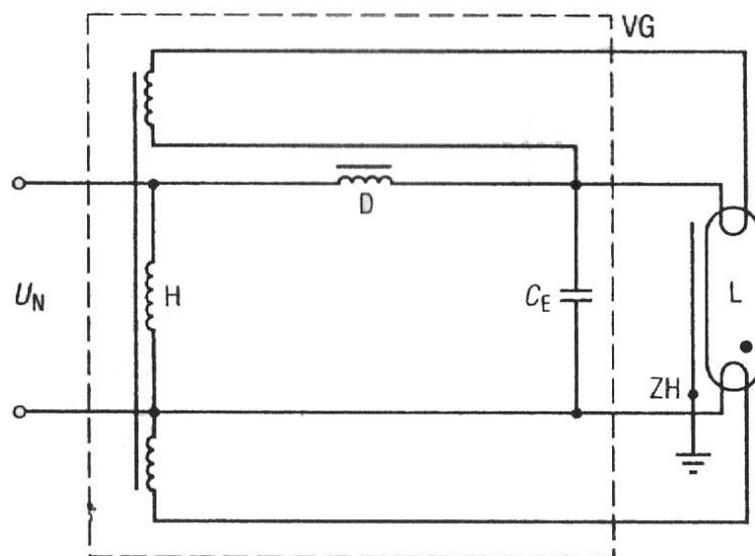


figura 4.10

All'applicazione della tensione, si forma una scarica luminescente a tensione molto bassa tra l'elettrodo e la parete in prossimità dell'ausiliario di innesco, collegato a terra. Questa scarica, per effetto della ionizzazione progressiva che essa provoca all'interno del tubo, si estende sempre più verso l'elettrodo opposto fino a raggiungerlo, innescando definitivamente l'arco.

Tubo di scarica “conduttore” (lampade SA, lampade X)

Un risultato analogo al precedente è conseguibile rendendo conduttiva una larga striscia interna del bulbo in modo da formare un'elevata capacità tra questa ed entrambi gli elettrodi: la scarica si propaga in tal caso inizialmente sotto forma di scariche luminescenti parziali che si estendono dalle due estremità fino alla parete, propagandosi poi lungo il tubo fino a ricongiungersi formando la scarica completa e definitiva.

Alimentatori risonanti

Alla famiglia dei sistemi ad accensione rapida senza starter appartiene anche l'alimentatore risonante di figura 4.11, che consente di ottenere più elevate tensioni di innesco, rendendo in tal modo più sicura l'accensione della lampada e nel contempo assicurando una minor corrente di riscaldamento degli elettrodi a regime.

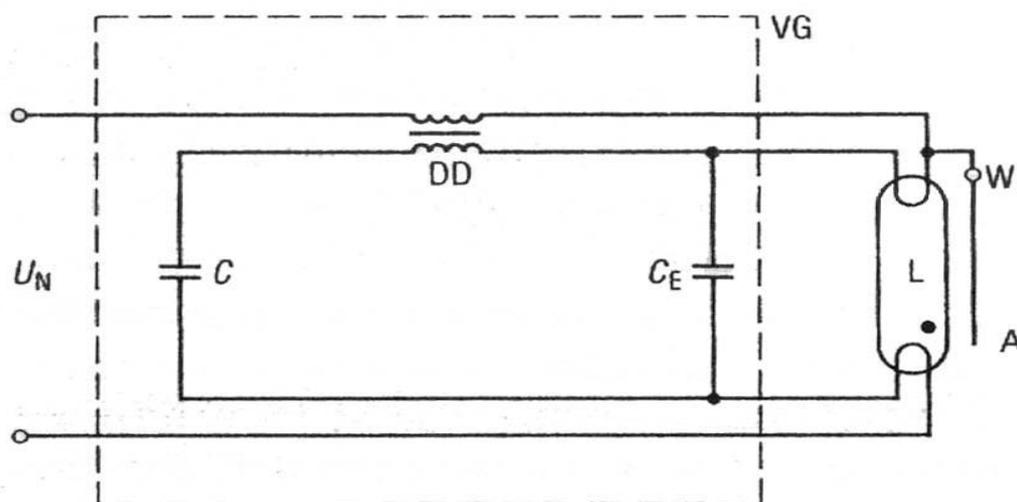


figura 4.11

Alimentatori elettronici in corrente alternata

Questi alimentatori si basano sul fatto che l'alimentazione di una lampada a scarica in alta frequenza consente di limitare moltissimo le dimensioni, i pesi e soprattutto le perdite dell'induttore stabilizzatore richiesto per un arco a 50 Hz. La figura 4.12 mostra uno schema tipico di alimentatore elettronico in corrente alternata e comprende :

- 1) raddrizzatore della tensione di alimentazione a 50 Hz e un circuito di filtro dei disturbi ad alta frequenza generati dall'apparecchio;
- 2) filtro della corrente continua;
- 3) invertitore c.c./c.a. che produce la tensione ad alta frequenza;
- 4) induttore ad alta frequenza (normalmente una piccola bobina con nucleo di ferrite).

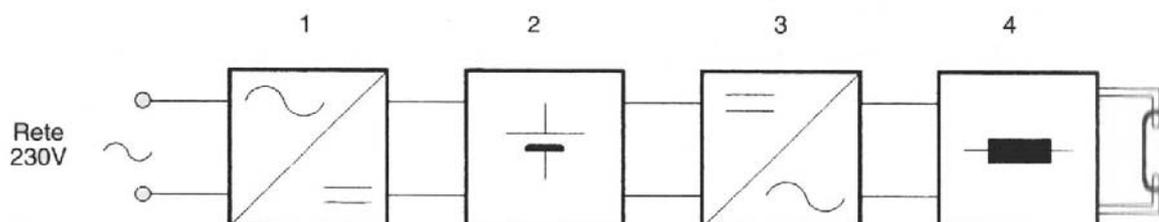


figura 4.12

Gli alimentatori elettronici devono soddisfare determinati requisiti relativi alla qualità e all'affidabilità come ad esempio:

- Conformità alle caratteristiche delle singole lampade
- Compatibilità elettromagnetica e immunità
- Lunga durata e affidabilità anche in apparecchi d'illuminazione stretti

Oltre ai vantaggi economici ed ecologici offerti dagli alimentatori elettronici, occorre anche ricordare che la luce ad alta frequenza produce effetti positivi

sull'uomo. Nuove ricerche condotte nell'ambito dell'ergonomia, come l'analisi comparativa eseguita dallo Studio di ingegneria Christian Bartenbach di Innsbruck lo confermano. Lo sfarfallio latente rappresenta un fattore di stress per l'uomo, un fenomeno che aumenta durante il lavoro davanti ad un video terminale. Le conseguenze sono affaticamento anticipato, deconcentrazione ed errori in sede di elaborazione di testi. Contrariamente alle lampade con alimentatore convenzionale, le lampade fluorescenti dotate di alimentatore elettronico generano una luce priva di sfarfallio. Infine, considerato che la frequenza di lavoro è decisamente al di sopra di quella udibile, il ballast elettronico non genera alcun ronzio contribuendo pertanto a creare un'atmosfera gradevole e distensiva. Ben evidenti, inoltre, sono i vantaggi in termini di costo di esercizio. Infatti la potenza assorbita dall'alimentatore elettronico si riduce di circa il 30%, il rendimento del flusso luminoso supera quello tradizionale del 10-20%, lo sviluppo di calore si riduce del 30%. Il decadimento temporale del flusso luminoso è inferiore e la durata del tempo di vita medio delle lampade aumenta del 30-50% . Tutti aspetti che contribuiscono ad un minor consumo energetico e globalmente ad un minor impatto ambientale.

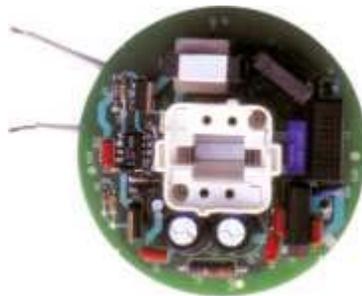


figura 4.13

Valutando le attività svolte a video si è potuto dimostrare che l'impiego di alimentatori elettronici offre notevoli vantaggi non soltanto per il benessere dell'uomo ma anche la qualità del lavoro (alcuni tipi di alimentatori elettronici (prodotti dalla ISIS s.r.l.) in figura 4.14):



figura 4.14

Gli svantaggi di questi alimentatori sono dovuti al costo elevato, alla delicatezza del cablaggio interno alla lampada, alle maggiori problematiche EMC e all'affidabilità del sistema. Sono presenti sul mercato anche alimentatori elettronici controllabili. Questi aggiungono ai vantaggi già menzionati dei normali elettronici, la possibilità di variare il flusso luminoso emesso delle lampade da 1% al 100% a seconda delle lampade e dei modelli. Quando non è strettamente necessario, è preferibile utilizzare modelli con una regolazione più limitata (dal 10-20% al 100%) che sono più economici.

Alimentatori elettronici alimentati in corrente continua

Trattasi di sistemi utilizzati laddove la rete fornisce una tensione in corrente continua: trasporto pubblico (aerei, treni, autobus), illuminazione di emergenza da rete centralizzata alimentata da sistemi di accumulatori in c.c.

4.1.5 Regolazione del flusso

I regolatori di flusso luminoso sono anche chiamati *dimmer*. La regolazione del flusso luminoso per lampade ad incandescenza e ad alogeni può essere generalmente attuata riducendo la tensione ai capi della lampada: nelle lampade funzionanti sul principio dell'incandescenza ciò non provoca alcun rischio di spegnimento mancando in esse qualsiasi processo d'arco. Occorre però considerare che la riduzione della tensione provoca anche, nel caso delle lampade ad alogeni, la riduzione della loro vita utile: il processo alogeno richiede infatti un funzionamento prossimo alla tensione nominale per evitare corrosione nei catodi e annerimento di bulbi. E' perciò buona regola, nel caso di lampade ad alogeni, intervallare il funzionamento a flusso ridotto con brevi periodi, dell'ordine dei 15 minuti, di funzionamento a flusso normale. I principali sistemi di regolazione sono costituiti da:

- Regolatori a resistenza variabile: possono essere applicati direttamente sui circuiti di lampada o a monte di eventuali trasformatori o autotrasformatori. Sono dispositivi assai poco idonei sotto il profilo energetico, ed ormai pressoché scomparsi dal mercato vista la loro inefficienza e la grande quantità di calore che producono.
- Regolatori elettronici, costituiti da componenti elettronici adatti sia all'alimentazione diretta, sia all'alimentazione tramite trasformatori (autotrasformatori) ferromagnetici o elettronici. Il principio di funzionamento dei regolatori elettronici si basa sulla variazione della tensione ai capi della lampada o della durata della conduzione di ogni semiperiodo (regolazione di fase). La struttura di dettaglio dei regolatori di flusso è dominio dei singoli costruttori. Per evitare brutte sorprese nell'adozione degli stessi è necessario attenersi alle seguenti indicazioni:
 - 1) Per i regolatori da applicare a trasformatori elettromagnetici utilizzare solo dispositivi adatti a carichi fortemente induttivi, dichiarati adatti dal costruttore del trasformatore, tali da effettuare

una regolazione rigorosamente simmetrica nelle due semionde positiva e negativa (per evitare l'introduzione di pericolose componenti continue nel trasformatore);

- 2) Per i regolatori da applicare a trasformatori elettronici, attenersi scrupolosamente alle indicazioni del costruttore del trasformatore.

Le lampade ad incandescenza e ad alogeni e quelle fluorescenti possono essere regolate in modo da ridurre il flusso luminoso da 0 al 100% , mentre le altre lampade possono venir regolate fino ad un valore del flusso luminoso emesso pari 50% di quello nominale (valore detto *top dimming*). A livelli di flusso inferiori del top dimming, le lampade al sodio ad alta pressione e quelle ad alogenuri metallici presentano una variazione forte del colore della luce emessa. Inevitabilmente la regolazione comporta una variazione dei parametri colorimetrici spesso inaccettabile, infatti la temperatura di colore della lampada varia con la riduzione del flusso luminoso. Nel caso delle lampade a scarica, sussiste il problema della riaccensione dell'arco ad ogni passaggio per lo zero della corrente, quindi una regolazione basata soltanto sull'ampiezza della tensione applicata non sarebbe adatta allo scopo (infatti, nelle lampade a scarica, al di sotto di un certo valore di tensione, la scarica diviene instabile e si interrompe la corrente tra i due elettrodi principali. Vengono perciò impiegati sistemi basati sulla "riduzione della corrente", come nelle figure 4.15, 4.16,4.17.

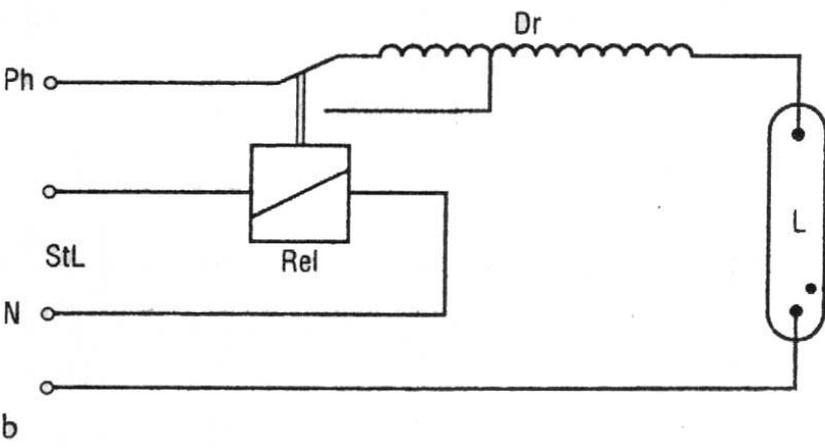
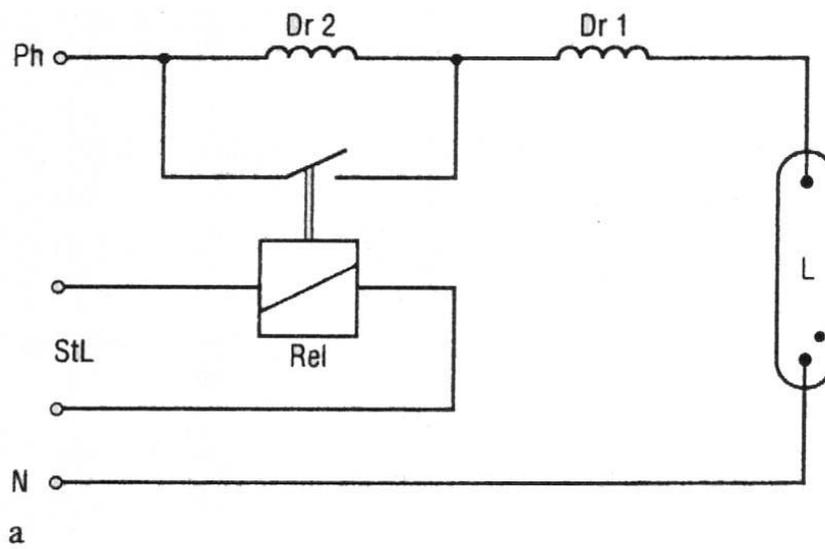


figura 4.15

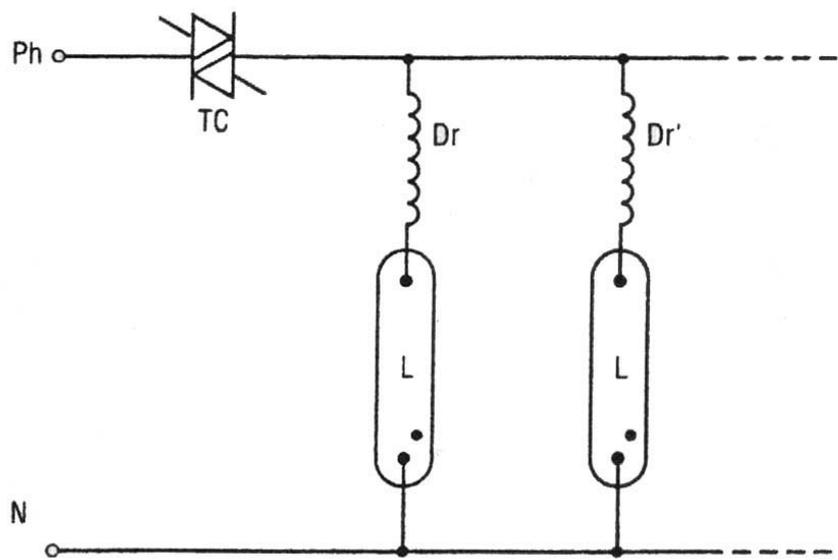


figura 4.16

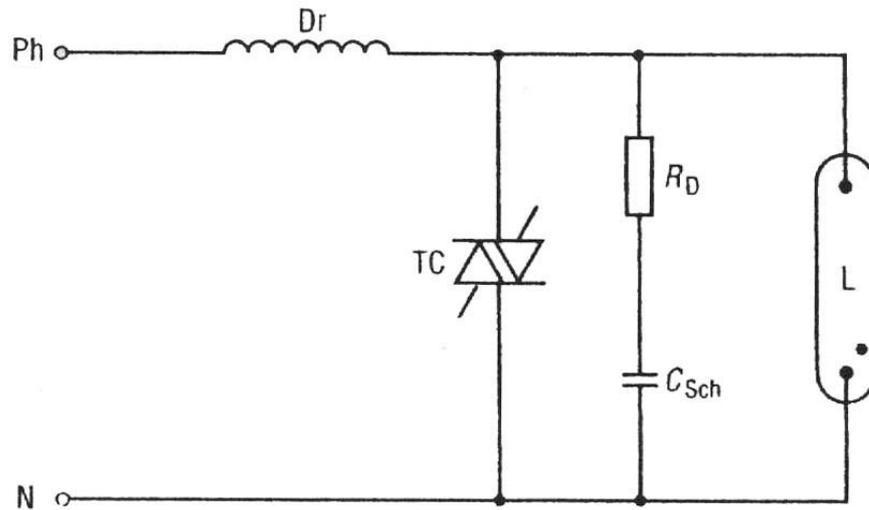


figura 4.17

Lo schema di figura 4.15 è molto utilizzato per la riduzione di flusso negli impianti di illuminazione stradale, ovvero sistemi basati sulla regolazione di fase che prevedono l'impiego di dispositivi elettronici comandati secondo gli schemi di figura 4.16 e 4.17. Nello schema di figura 4.15 viene essenzialmente modificata la corrente variando, tramite il relè Rel, il valore dell'induttanza stabilizzatrice dell'arco, D_r . Negli schemi delle figure 4.16 e 4.17 il dispositivo elettronico effettua un controllo della corrente o della tensione mediante tecniche di interdizione parziale delle grandezze, in modo simmetrico, nell'ambito di ogni semiperiodo. Per le lampade al sodio a bassa pressione, la regolazione del flusso luminoso è sconsigliabile, per la riduzione della vita della lampada che ne conseguirebbe.

4.1.6 Vita media e decadimento del flusso luminoso

Ci sono molti metodi per definire la vita di una lampada o di un gruppo di lampade compreso in un'installazione:

- Vita tecnica individuale : numero delle ore di accensione dopo le quali una lampada va fuori servizio o è considerata tale secondo determinate specifiche.

- Vita minima : garantita dal fabbricante, è il numero minimo di ore di vita delle lampada.
- Vita media.

E' impossibile prevedere la vita individuale di una lampada, dal momento che questa è funzione di molti fattori; senza dubbio, condizioni sfavorevoli di funzionamento ne riducono la durata. I fattori che maggiormente influenzano la vita di una sorgente luminosa sono, in pratica, gli stessi che influenzano il decadimento del flusso nel tempo: la temperatura ambiente, la variazione del valore nominale della tensione e della frequenza di alimentazione, il numero e la frequenza di accensioni, il tipo di alimentatore e accenditore usati nel caso si tratti di lampada a scarica, le sollecitazioni meccaniche, ecc. A seguito di ciò è possibile stabilirne la vita media, definita come "il numero di ore di funzionamento dopo il quale il 50% delle lampade di un congruo e rappresentativo lotto, funzionante in condizioni stabilite, si spenge". La vita media, comunemente denominata anche vita utile, viene fornita dai costruttori insieme alla curva di decadimento del flusso luminoso, quest'ultima riferita al valore nominale del flusso luminoso. Solitamente, il valore nominale del flusso luminoso è il valore misurato dopo 10 ore di funzionamento nel caso di lampade a filamento, e dopo 100 ore di funzionamento nel caso di lampada a scarica. Esistono altri modi per definire la vita di una lampada: tra essi il più ricorrente è quello di *vita economica*, riferita sempre ad un dato impianto. La fine della vita economica di una lampada è l'istante a partire dal quale, a causa del numero delle lampade andate fuori uso e causa della riduzione di flusso subito dalle rimanenti, il flusso totale emesso scende al di sotto di un valore percentuale prefissato (assunto come il 100% il flusso totale emesso inizialmente da tutte le lampade installate nell'impianto). Il concetto di vita economica può essere meglio compreso se si considera che talvolta le lampade continuano a funzionare anche dopo che la vita media è stata superata, lavorando in condizioni di bassa efficienza. Come abbiamo accennato la temperatura

ambiente è uno dei fattori che influenzano la vita media, infatti le lampade sono generalmente costruite per lavorare in condizioni di temperatura normali (temperatura esterna compresa nella fascia tra -30°C e $+50^{\circ}\text{C}$). In ogni caso, poiché molte lampade producono una grande quantità di calore, le temperature di lavoro possono considerarsi maggiori soprattutto in apparecchi chiusi. Mentre le lampade ad incandescenza non danno problemi, quelle a scarica ad alta pressione possono non accendersi a temperature inferiori a -30°C . Una volta accese, invece, non danno alcun problema anche a temperature prossime ai -50°C . Per quanto riguarda le lampade fluorescenti, il fattore determinante è rappresentato dalla parete del tubo, in quanto determina la pressione interna del vapore di mercurio. Se la temperatura della parete scende al di sotto di $+15^{\circ}\text{C}$, il flusso luminoso diminuisce rapidamente.

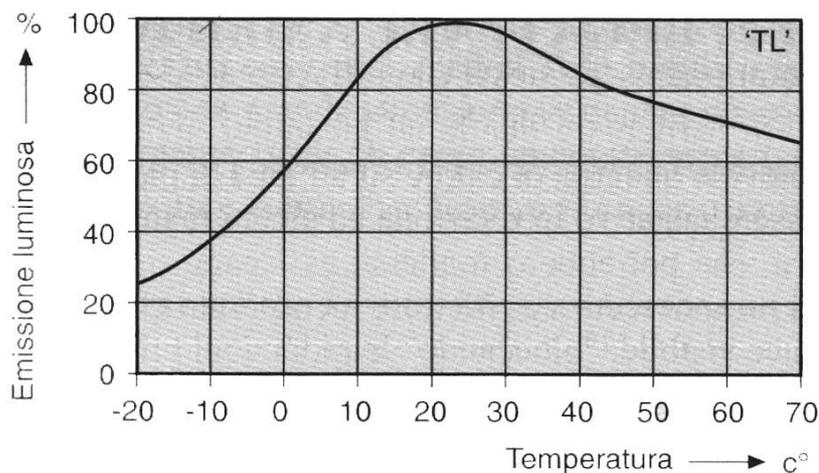


figura 4.18

Nel grafico di figura di figura 4.18 possiamo vedere l'andamento dell'emissione del flusso luminoso in funzione della temperatura della parete del tubo di scarica di una lampada fluorescente.

Le lampade ad incandescenza lavorano bene fino a temperature massime di 200°C sull'attacco a vite e 370°C sul bulbo. Particolari lampade ad incandescenza sopportano temperature di attacco di 260°C e più, e del bulbo fino 520°C . Le lampade a scarica ad alta pressione non presentano problemi

anche a temperature abbastanza elevate. Assai diverso è il comportamento delle lampade fluorescenti: nel caso in cui la temperature superasse i 50°C si avrebbe una netta diminuzione del flusso luminoso e della resa del calore. La vita e l'efficienza possono venire modificate entro certi limiti, variando la tensione di alimentazione. Se infatti l'efficienza ha importanza prevalente, come nel caso di illuminazione sportiva, e in casi simili in cui le ore di accensione annue sono limitate, si possono alimentare con una tensione superiore del 10 o 15% di quella nominale. Ne consegue un forte aumento dell'efficienza a scapito della vita media. Un altro fattore che influisce sulla vita delle lampade è la posizione di funzionamento, infatti, non tutte le lampade possono funzionare in qualsiasi posizione. Le ragioni sono di tipo meccanico (abbassamento del filamento o insudiciamento degli elettrodi) o termico. Il funzionamento delle lampade in posizioni da quelle prescritte ne riduce sensibilmente la durata.

In ogni caso il flusso luminoso di tutte le lampade diminuisce nel tempo (e per alcune di esse aumenta anche la potenza assorbita). Le cause di questo decadimento sono varie. Nelle lampade ad incandescenza il tungsteno evaporato durante le ore di funzionamento annerisce il bulbo riducendone la trasmittanza ed inoltre il filamento stesso, assottigliandosi, provoca un aumento della sua resistenza elettrica con conseguente diminuzione della corrente che lo attraversa. Nelle lampade a scarica, l'annerimento del tubo è causato dall'evaporazione del materiale che compone gli elettrodi: sulle fluorescenti, l'esaurimento delle polveri rimane la causa principale del deprezzamento. Molto spesso l'effetto del decadimento del flusso si accompagna ad cambiamento (*shift*) di colore della sorgente stessa con una conseguente riduzione dell'indice Ra. Vediamo rappresentata nel grafico di figura 4.19 la curva di decadimento del flusso luminoso per un tipo di lampada ad incandescenza.

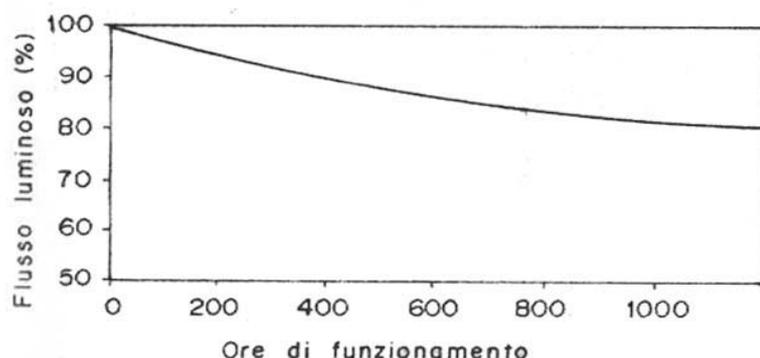


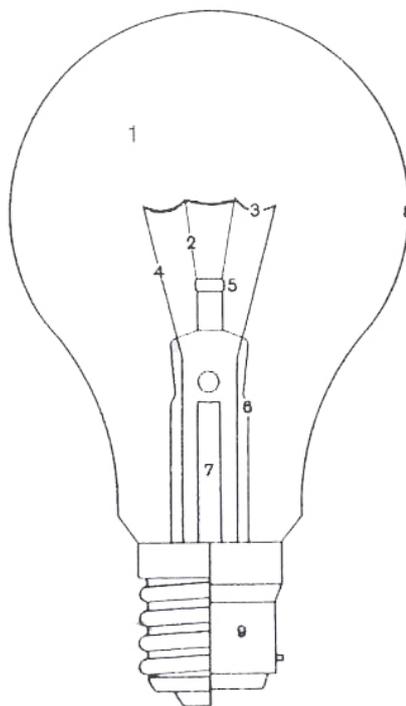
figura 4.19

4.2 Lampade ad incandescenza

Le prime lampade a incandescenza di impiego pratico consistevano in un filamento di materiale d'origine organica carbonizzato posto entro un'ampolla di vetro in cui era fatto il vuoto. Due fili di platino che attraversavano la parete dell'ampolla e raggiungevano l'estremità del filamento di carbone, permettevano di far passare attraverso quest'ultimo una corrente elettrica che, per effetto Joule, provocava il riscaldamento del filamento anzidetto. Tutti i perfezionamenti immediatamente successivi riguardano, oltre che la soluzione di piccoli problemi secondari, quello fondamentale del miglioramento della qualità del filamento. Per la costruzione di questo, dopo aver abbandonato il cotone, venne impiegata prima la carta, poi il bambù, per la carbonizzazione del quale vennero immaginati diversi metodi, quindi la cellulosa pressata e trafilata, successivamente anche ricoperta con grafite. Tutti questi tentativi di modifica della natura del filamento consentirono di elevare l'efficienza luminosa delle lampade, dal valore iniziale di poco più di 1 lm/W fino ai 4.2 lm/W dell'esemplare più perfezionato, munito di filamento di cellulosa ricoperto di grafite realizzato intorno al 1905. Nello stesso periodo non mancarono tentativi di utilizzare filamenti metallici (di platino da parte di Edison, di osmio da parte di Auer von Welsbach, di tantalio da parte di Bolton). Le lampade così

realizzate ebbero però modestissima diffusione principalmente a causa dell'alto costo dei metalli proposti, tutti assai rari, nonché della bassa temperatura di fusione di essi che costringeva a mantenere la temperatura di funzionamento a un livello molto modesto.

Si giunse così ben presto a individuare, come materiale particolarmente adatto, il tungsteno (W) a causa dell'elevata temperatura di fusione (il tungsteno è un radiatore selettivo che ha il suo punto di fusione a 3.650 K), della modesta velocità di sublimazione, della bassa emissività spettrale nel campo del vicino infrarosso. Nonostante la lunga continua evoluzione tecnologica del prodotto, il principio di funzionamento è rimasto sostanzialmente immutato: un metallo ridotto a sottilissimo filamento, inserito in un bulbo di vetro in cui è praticato il vuoto spinto e di cui si è provveduto al riempimento con una determinata quantità di gas inerti, è attraversato da corrente elettrica, continua o alternata che ne provoca il surriscaldamento fino all'incandescenza, a temperatura molto elevata (dai 2100°C ai 3100°C secondo il tipo di lampada), con emissione di radiazioni luminose, insieme ad una quota cospicua di radiazioni infrarosse e ad una piccolissima quantità di radiazioni ultraviolette. Il cuore della sorgente (figura 4.20) è il filamento metallico che oppone resistenza al transito della corrente elettrica.



Nella figura abbiamo :

- 1) Gas inerte di riempimento;
- 2) Sostegni in molibdeno del filamento;
- 3) Filamento spiralizzato in tungsteno;
- 4) Conduttori elettrici in nichel e in rame all'interno del supporto di vetro e in rame fino alle saldature con l'attacco;
- 5) Bottone in vetro;
- 6) Supporto in vetro;
- 7) Tubetto in vetro utilizzato per l'estrazione dell'aria e per l'introduzione del gas inerte;
- 8) Bulbo in vetro;
- 9) Attacco (a vite o a baionetta).

Quindi una lampada ad incandescenza comune è costituita da un'ampolla di vetro, da un filamento che si porta ad incandescenza, e da un supporto in vetro che sostiene il filamento nella posizione voluta. Il filamento è collegato ai due estremi a fili conduttori che fanno capo all'attacco e sono elettricamente isolati tra di loro. Comunemente l'attacco è a vite (attacco Edison). Vediamo più nello specifico queste parti :

a) *Ampolla* : Generalmente è in vetro resistente al calore. Nelle lampade per impieghi speciali, da proiezione o per esterno si impiega vetro cosiddetto "duro". Sono costruite in formati diversi per potenze e caratteristiche fotometriche, a seconda degli usi cui sono destinate. I principali tipi sono:

- Ad ampolla trasparente (figura 4.21a): sono le lampade più diffuse e più economiche, presentano la massima efficienza rispetto alle altre tipologie di questa famiglia di lampade;
- Ad ampolla diffondente (figura 4.21 b): presentano un'efficienza di poco inferiore a quella delle lampade ad ampolla trasparente; hanno il vantaggio, rispetto a queste ultime, di essere poco abbaglianti;

- A riflettore incorporato (figura 4.21c e 4.21d): queste lampade possono avere la calotta (parte frontale della lampada, sul lato opposto a quello del portalampade).

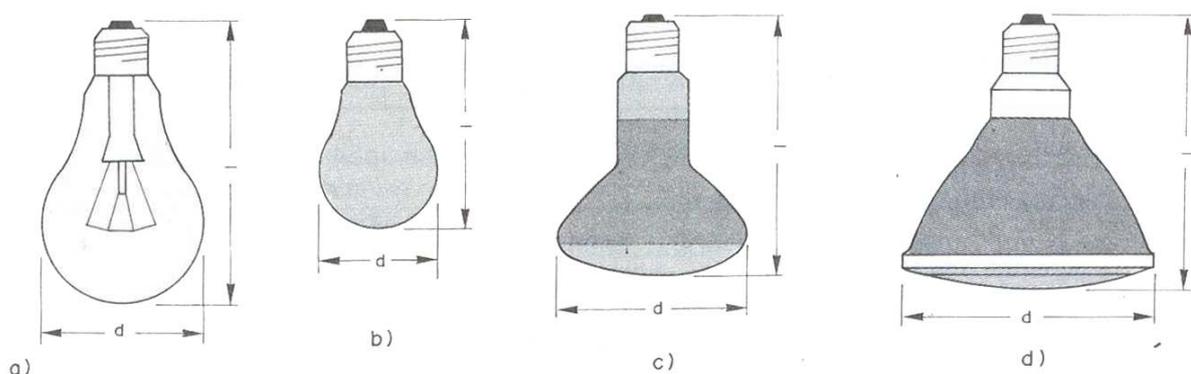


figura 4.21

b) *Attacco* : Le lampade di uso comune sono munite di attacco a vite detto “Edison” normale (E27) (figura 4.22). Alle lampade di piccola potenza si applicano attacchi *mignon* (E14) e *micromignon* (E10), mentre quelle di potenza superiore ai 300W vengono dotate di attacchi tipo *golia* (E40). Negli apparecchi soggetti a vibrazioni si impiegano attacchi a *baionetta*. Gli *attacchi prefocalizzati* vengono applicati alle lampade destinate ad ottiche di precisione, in cui si richiede che il filamento venga a trovarsi in un punto esattamente prestabilito. Le lampade di elevata potenza, con forti correnti di alimentazione, sono equipaggiate con attacchi bispina.

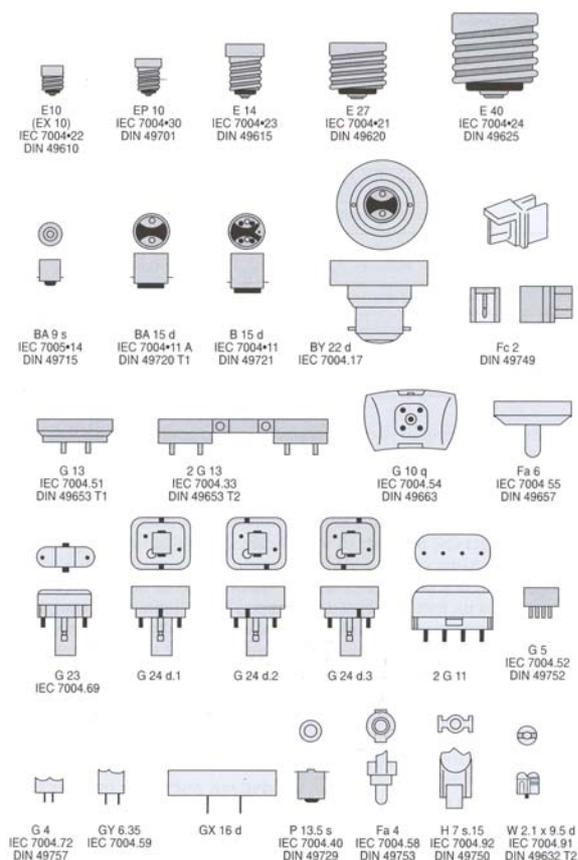


figura 4.22

Prima lettera	Tipo di attacco
B	Attacco a baionetta
BA	Attacco a baionetta per lampade auto
BM	Attacco a baionetta per lampade da miniera
E	Attacco a vite (Edison)
F	Attacco a una spina conduttrice
Fa	Con una spina cilindrica
Fb	Con una spina scanalata
Fc	Con una spina di forma particolare
G	Attacco a spina con due o più spine
K	Attacco a cavi
P	Attacco prefocus
R	Attacco a contatti incassati (<i>recessed</i>)
S	Attacco a manicotto (<i>shell</i>)
SM	Attacco per lampade da miniera
SV	Attacco con estremità conica
T	Attacco per lampade telefoniche
W	Attacco a cuneo (<i>wedge</i>)
EF	Attacco Edison con spinotto centrale conduttore
SF	Attacco cilindrico con spinotto centrale conduttore
PSF	Attacco prefocus con spinotto centrale conduttore
PK	Attacco prefocus con cavo

figura 4.23

c) *Filamento* : Costituisce la parte principale della lampada ed è composto di tungsteno avvolto a semplice o doppia spirale. L'emissione luminosa è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta del filamento; quest'ultima, a parità di durata della lampada, può essere tanto più elevata quanto maggiore è la sezione del filamento stesso: ne consegue che, a parità di tensione, l'efficienza cresce al crescere della potenza e a parità di potenza l'efficienza è maggiore nelle lampade a bassissima tensione (figura 4.24):

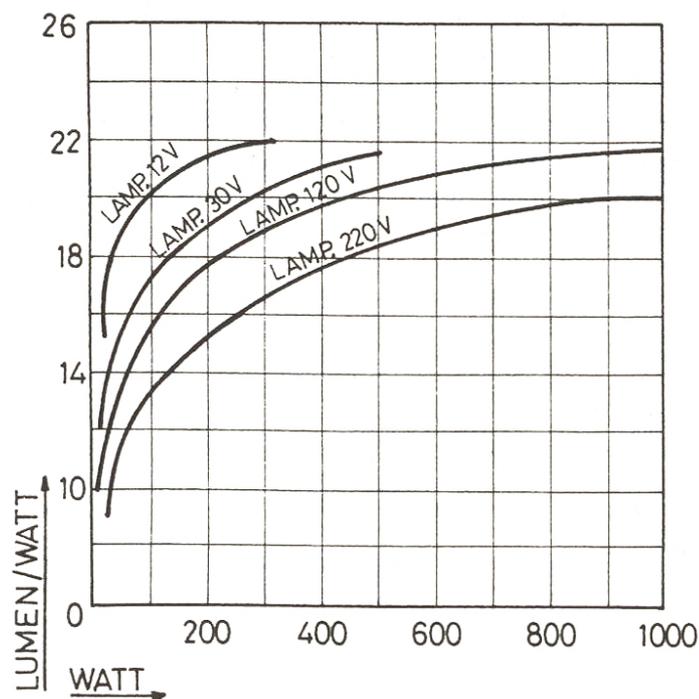


figura 4.24

I fattori principali che influiscono sul funzionamento, la resa e la durata della lampada ad incandescenza sono:

- a) Il punto di fusione dei materiali di cui è costituito il filamento ;
- b) Il fattore spettrale di emissione del filamento ;
- c) La tensione di vapore del filamento ;

d) Il rapporto tra la resistenza elettrica del filamento alla temperatura ambiente e quella di funzionamento.

Il filamento delle lampade ad incandescenza attualmente usato è di tungsteno; le prestazioni complessive ottenute con questo materiale sono le migliori al giorno d'oggi; le sue caratteristiche sono le seguenti:

a) Il punto di fusione è a 3680 °K, ma le temperature di funzionamento sono, per ragioni ovvie, inferiori, variando a seconda del tipo di lampada da ca. 2800 °K (per le lampade a riempimento di gas inerte) a 3200 °K (per le lampade a ciclo di alogeni).

b) Il tungsteno appartiene al gruppo di materiali con emissione selettiva, cioè il fattore di emissione spettrale ϵ è una funzione della lunghezza d'onda λ . Il primo massimo, sempre per le temperature di funzionamento, si trova verso il violetto-blu, il secondo nel vicino infrarosso; però una notevole frazione delle radiazioni è emessa nello spettro visibile. La efficienza luminosa di queste lampade è tuttavia da considerarsi bassa, avendo dei valori compresi tra 12 e 24 lm/W a seconda del tipo e della potenza della sorgente.

c) la durata del filamento dipende, oltre che dalle caratteristiche meccaniche e dalle sollecitazioni termiche, dalla tensione di vapore del materiale alla temperatura di operazione. La tensione di vapore è una caratteristica del materiale ed è una funzione della temperatura $T = f(p)$; essa aumenta col crescere della temperatura. La durata del filamento diminuisce col crescere della tensione di vapore e della velocità di evaporazione.

d) anche la resistenza elettrica del materiale varia con la temperatura. La resistenza elettrica del tungsteno alla temperatura di operazione è ca. 10 volte superiore a quella a temperatura ambiente, cioè la corrente iniziale supera ca. 10 volte quella di funzionamento.

L'insieme delle qualità richieste al filamento fa cadere oggi ancora la scelta sull'uso del tungsteno. La tecnologia di queste lampade è progredita per vari aspetti facendo aumentare la durata e la efficienza luminosa. Nelle prime lampade si praticava nell'ampolla di vetro il vuoto, con lo scopo di ridurre le dispersioni di calore per convezione. Il difetto principale di questa soluzione consisteva nel rapido annerimento del vetro, prodotto dal deposito metallico sulla superficie fredda dell'ampolla, accompagnato ad una diminuzione della trasparenza e quindi del flusso luminoso uscente. Per ridurre e rallentare l'annerimento dell'ampolla la si riempiva con un gas inerte (argon, azoto, ecc.). La presenza del gas riduce il libero cammino medio delle particelle di tungsteno evaporate dal filamento e favorisce anche la retrodiffusione, così che si ottiene un rallentamento della velocità di evaporazione.

Negativo è l'aumento della dispersione del calore per convezione, che però nelle lampade odierne si contrasta utilizzando dei filamenti doppiamente spiralati. Nell'insieme si è ottenuto così un miglioramento tecnologico, ma non si è riusciti ad eliminare l'annerimento dell'ampolla.

Le lampade normali vengono costruite per una vita media di 1000 ore a tensione nominale; quelle di tipo proiezione, a cui si richiede un'alta efficienza, hanno generalmente una vita molto più corta (da 10 a 100 ore). La vita e l'efficienza possono venire modificate entro certi limiti, variando la tensione di alimentazione (figura 4.25). E' noto che, quando il metallo accumula, per effetto Joule, molta energia termica, inizia ad assumere rilevanza il fenomeno della sublimazione, cioè il cambiamento di stato fisico del metallo da solido a vapore. Il vapore del metallo liberatosi tende a condensarsi, tornando così all'originario stato solido, a contatto con le superfici relativamente più fredde, in specie con la parete interna dell'ampolla di vetro da cui è circondato. Le minute particelle metalliche che si depositano ombreggiano la calotta dall'interno, cagionando l'assorbimento di una quota della radiazione emessa dal filamento incandescente. Si verificano i caratteristici annerimento e velatura, con il conseguente decremento dell'efficienza luminosa della sorgente. Gli atomi volatilizzati

riducono la sezione trasversale del filamento, rendendolo sempre più fragile. La sublimazione, pertanto, è all'origine di una riduzione della durata della lampada.

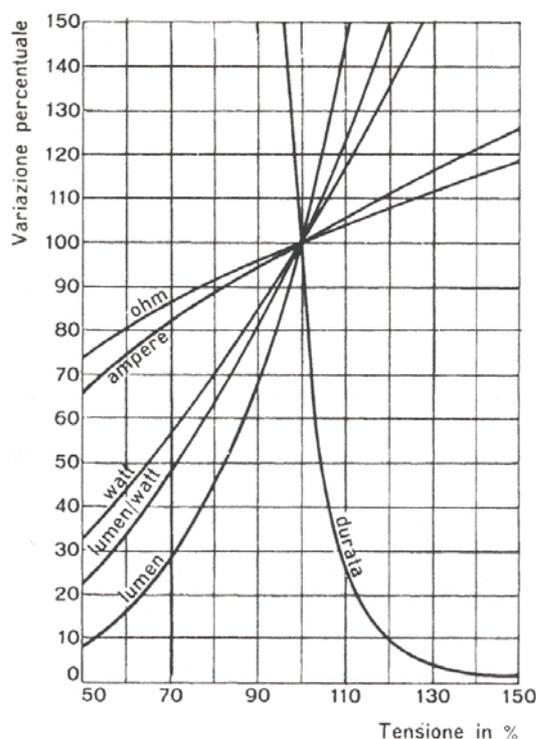


figura 4.25

E' da notare però, che all'inizio dell'impiego le lampade assorbono una potenza leggermente superiore di quella nominale, mentre il flusso emesso è leggermente inferiore. Gli eventuali controlli di fornitura debbono perciò essere eseguiti dopo qualche ora di funzionamento, oppure ammettendo scostamenti non eccedenti +4% per quanto riguarda la potenza assorbita e -13% per quanto riguarda il flusso emesso.

Nella tabella di figura 4.26 possiamo una scheda dei principali dati tecnici e prestazionali per lampade ad incandescenza.

Tipo di sorgente	Dimensioni mm	Attacco	Tensione di alimentazione (V)	Potenza nominale (W)	Potenza assorbita (VA)	Flusso luminoso (lm)	Efficienza luminosa (lm/W)	Durata media (ore)	Temperatura di colore (K)	Indice generale di resa cromatica (R_a)
Lampada a incandescenza – bulbo vuoto	80 × 45	E 14	230	15	15	105	7	1000	2750	100
Lampada a incandescenza – bulbo con gas inerti	105 × 60	E 27	230	15	15	115	8	1000	2800	100
»	105 × 60	E 27	230	40	40	430	11	1000	2800	100
»	105 × 60	E 27	230	100	100	1380	14	1000	2850	100
»	189 × 90	E 40	230	300	300	5000	17	1000	2850	100
»	274 × 130	E 40	230	1000	1000	18.800	19	1000	2850	100

figura 4.26

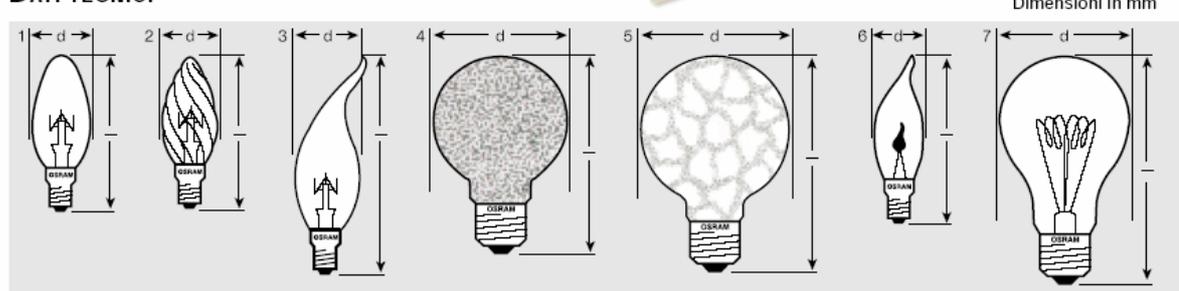
I principali limiti, per quanto attiene alle caratteristiche e alle prestazioni delle lampade a incandescenza, sono così sintetizzabili:

- caratteristiche dimensionali standard degli attacchi e del bulbo (vincolanti in termini di ingombro);
- alti consumi (basse efficienze luminose);
- alte emissioni termiche;
- ridotta durata di vita;
- tonalità di luce calde;
- ridotte temperature di colore.



Come anticipato nell'introduzione ci serviremo del catalogo commerciale della OSRAM s.p.a. per vedere quali sono i prodotti presenti sul mercato per ognuna dei tipi di sorgente luminosa trattate teoricamente, con un occhio ai data-sheets del produttore. Per quanto riguarda le lampade ad incandescenza, la OSRAM punta sull'effetto "lume di candela" non solo per quanto riguarda l'emissione luminosa calda e d'atmosfera, ma anche per quel che concerne la forma delle ampole, sempre più simili a piccole fiammelle. Per aumentare l'effetto "lume di candela" la linea Osram Decor utilizza filamenti di carbone

DATI TECNICI



TIPO Lampada	DECOR B GOLD 40	DECOR BW GOLD 40	DECOR BA GOLD 40	DECOR G80 ICE GOLD 60	DECOR G95 CROCO GOLD 60	DECOR B FLICKER 3	DECOR A CARBON 60
Potenza (W)	40	40	40	60	60	3	60
Tensione (V)	240	240	240	240	240	230 - 240	240
Diametro d (mm)	35	35	35	80	95	32	60
Lunghezza l (max.)	100	100	125	119	142	105	107.5
EAN 4050300	923659	064604	174884	923666	923673	923680	923697
Packaging (blister)	2 lampade	2 lampade	1 lampada	1 lampada	1 lampada	1 lampada	1 lampada
Attacco	E 14	E 14	E 14	E 27	E 27	E 14	E 27
Unità d'imballo (pezzi)	20	20	10	10	10	10	10
N° figura	1	2	3	4	5	6	7
Energy label*	F	F	F	F	F	-	G

* Classificazione in base all'efficienza secondo quanto previsto dalla direttiva 98/11/EU della commissione incaricata della classificazione energetica delle lampade per uso domestico.

4.2.1 Lampade ad alogeni

Di recente le prestazioni delle lampade a filamento di tungsteno sono state ulteriormente migliorate grazie alla realizzazione di un ciclo di reazioni chimiche, che si svolge a varie temperature all'interno della lampada. Per incrementare l'efficienza luminosa si deve aumentare la temperatura, il che sottopone il filamento ad una sollecitazione maggiore, anche in conseguenza dell'aumento della tensione di vapore del metallo che fa sì che il filamento si assottigli più rapidamente. Si calcola che è sufficiente una perdita di peso globale del filamento dell'1% per provocare in media una rottura. A ciò si

aggiunge la circostanza che il deposito del tungsteno metallico annerisce ancora più rapidamente l'ampolla. Per molti anni sono stati fatti degli studi tendenti ad evitare la deposizione del tungsteno sulle pareti del vetro ed anche a incrementare la retrodiffusione del metallo verso il filamento. La soluzione, che ha trovato l'applicazione pratica nelle lampade ad alogeni, consiste nello sfruttamento di un ciclo chimico che si svolge nelle varie zone di temperatura tra il filamento e la superficie dell'ampolla. La lampada è composta da una piccola ampolla di quarzo (che permette di raggiungere temperature della parete sufficientemente elevate) nella quale si introducono piccole quantità di alogeni (J, Br₂, Cl₂); oggi si usa di preferenza un composto del bromo. Nelle zone meno calde il vapore di tungsteno reagisce con l'alogeno, formando un alogenuro di tungsteno gassoso che è stabile alle temperature delle zone meno calde della lampada. L'alogenuro di tungsteno che si forma (ioduro di tungsteno in caso dello iodio) viene trasportato dalle correnti convettive verso la parete dell'ampolla: se la temperatura è compresa tra i 500 K e 1500 K, l'alogenuro di tungsteno non vi aderisce e ritorna verso il filamento. Giunto nelle immediate vicinanze, dove la temperatura supera i 2800 K, si riduce in tungsteno e vapore di metallo alogeno: il tungsteno si deposita sul filamento e il vapore di metallo è pronto per ricombinarsi con altri atomi di tungsteno che lasciano il filamento. Questo è un artificio per ricostruire il filamento che, seppure in maniera casuale, consente comunque di incrementare la vita della lampada (ca. 2000 ore) per temperature di filamento comprese tra i 300 K e i 3400 K. In maniera casuale perchè, ogni volta che il tungsteno libero si deposita sul filamento dal quale ciclicamente si separa, questo non ritorna esattamente nel punto dal quale si è volatilizzato. Il filamento perciò non si rigenera mai integralmente ed è sempre soggetto a logoramenti localizzati. Un altro effetto del ciclo di alogenuri è quello di evitare l'annerimento e favorire la retrodiffusione in fase gassosa. All'esame dei fatti, la retrodiffusione delle lampade a riempimento di gas inerte è dell'ordine di grandezza di quelle ad alogeni, ma queste ultime presentano dei vantaggi tecnici non trascurabili:

- a) Il fenomeno dell'annerimento è praticamente soppresso, e quindi la efficienza è costante nel tempo.
- b) Eliminando l'annerimento, le ampole delle lampade possono essere piccole, il che permette l'impiego di gas rari ad alta pressione consentendo un aumento della durata e della efficienza. La temperatura della parete dell'ampolla è superiore a quella delle lampade normali; ciò è necessario per la realizzazione del ciclo chimico con gli alogeni, ma d'altra parte richiede l'uso del quarzo o di vetri speciali.
- c) Il gas Krypton che si presta a queste applicazioni è molto costoso, ma può essere utilizzato egualmente date le ridotte dimensioni di queste lampade.
- d) La efficienza luminosa è superiore a quella delle lampade ad incandescenza normale ed è intorno a 22-24 lm/W.

Strutturalmente sono costituite da un sottile tubo di quarzo, contenente un filamento a spirale di tungsteno rettilineo. In realtà “quarzo” è un termine usato impropriamente: il nome esatto è *vetro borosilicato*, che è un materiale trasparente alle radiazioni visibili, alle radiazioni infrarosse e a quelle ultraviolette e capace di resistere fino a temperature dell'ordine dei 1200÷1300K. Le loro piccole dimensioni permettono la costruzione di apparecchi ad elevato controllo del fascio luminoso, che si prestano ad illuminazioni di carattere particolare. La temperatura di colore è di circa 3000 K e sale a 3200÷3400 K nelle lampade espressamente costruite per le riprese cinematografiche e televisive.

I principali tipi sono:

- lampada a tensione di rete a doppio attacco (fig. 4.27e): i formati prodotti comprendono le potenze da 60 W a 2000 W, con un'efficienza da 15 a 22 lm/W (e quindi superiore di circa il 10% a quella delle lampade a incandescenza a parità di potenza);
- lampade a tensione di rete con attacco a vite o a baionetta (fig. 4.27f): esistono in esecuzione con ampolla trasparente e con ampolla diffondente;

- lampade a bassissima tensione (6, 12, 24 V) nude (fig. 4.27g): sono lampade di dimensioni assai ridotte, con ampolla in quarzo e attacco bispina; i pregi di queste lampade possono così riassumersi: compattezza, maggior durata rispetto alle lampade ad incandescenza (2000 ore anzichè 1000), efficienza luminosa superiore del 50% (ma prescindendo dalle perdite nel trasformatore, necessario per alimentarle dalla tensione di rete), a quella delle lampade ad incandescenza della stessa potenza;

- lampade a bassissima tensione (6, 12, 24 V) con riflettore incorporato (fig. 4.27h) : vengono costruite con riflettore argentato, dorato o diecrico (quest'ultimo tipo consente di limitare in modo apprezzabile la radiazioni infrarosse indirizzate verso gli oggetti illuminati), con una notevole varietà di aperture del fascio luminoso (da 3° a 60°) e di intensità massima (fino a 45000 cd).

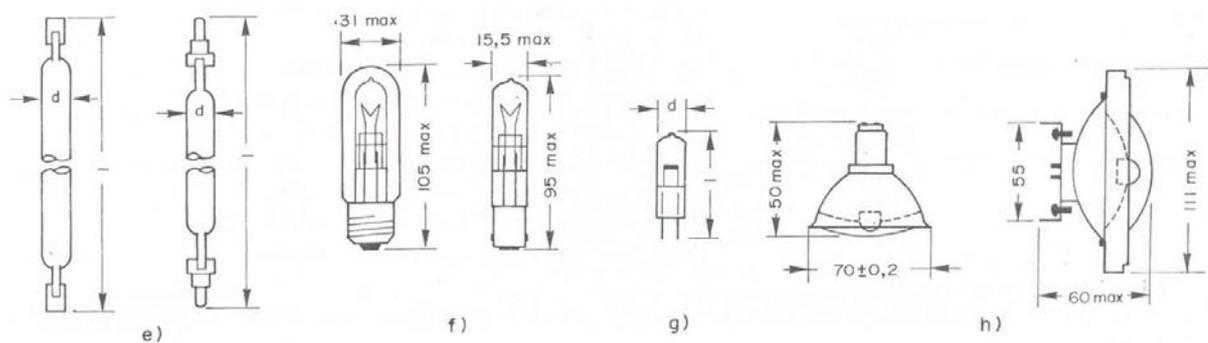


figura 4.27

Sono in produzione lampade a ciclo di alogeni alimentate a 230V con attacchi di vario tipo. Hanno ampia diffusione le tubolari a doppio attacco di varia lunghezza e potenza. Per ragioni di sicurezza si impone sempre l'uso del vetro frontale di protezione, meglio se in grado di assorbire le pur modeste radiazioni ultraviolette. Nell'attimo della rottura del filamento è possibile che si inneschi l'arco elettrico tra i due monconi spezzati, supportato dalle piccole dosi di ossigeno presenti nel bulbo, data l'impossibilità di ottenere il vuoto completo nel processo di fabbricazione della lampada e a causa delle piccole infiltrazioni nella regione dell'attacco. L'arco si forma repentinamente, prima che intervenga

l'azione protettiva di fusibili o di interruttori automatici (la lampada incorpora un fusibile che apre il circuito di alimentazione in caso di arco di scarica. Viene così eliminata l'eventualità di pericolosi sovracorrenti con conseguente esplosione della lampada). La scarica di corrente che ne deriva porta il bulbo della lampada a temperature e a pressioni interne talmente elevate da procurarne l'esplosione. A questo punto, se l'apparecchio in cui è inserita la sorgente non è fornito di un idoneo vetro protettivo, o altro elemento che funga da schermatura, i minuscoli frammenti di quarzo ad alta temperatura prodotti dall'esplosione sono scagliati con violenza all'esterno. Oltre alle recenti normative in materia, sono le stesse case produttrici che prescrivono, nelle avvertenze per l'uso allegate alla confezione del prodotto, l'adozione della schermatura.

Miglioramenti in termini di efficienza luminosa sono stati conseguiti recentemente con un nuovo modello di lampada ad alogeni tubolare a doppio attacco. La novità riguarda il bulbo tubolare costruito in quarzo additivato con cerio. Questo materiale ha la proprietà di riflettere una parte delle radiazioni infrarosse prodotte dal filamento di tungsteno. Le radiazioni IR riflesse contribuiscono a mantenere il filamento al regime termico di funzionamento consentendo un risparmio di energia elettrica. Il risparmio di energia è quantificabile in circa il 25% rispetto al consumo di una normale lampada ad alogeni. La lampada riduce altresì l'emissione termica verso l'ambiente circostante nella misura del 30% rispetto all'emissione di una normale lampada ad alogeni. Inoltre le lampade a ciclo di alogeni si distinguono per una emissione luminosa di particolare pregio: la luce prodotta è brillante, chiara, vivace, più vicina, come tonalità, a quella del sole, in grado di esaltare tutte le gamme e le sfumature cromatiche. In particolare la luce prodotta contiene una quantità maggiore di blu e minore di giallo. Nella tabella di figura 4.28 possiamo vedere le caratteristiche dei tipi più comuni di lampade ad alogeni nude per tensione di rete. In quella di figura 4.29 abbiamo le caratteristiche per quanto riguarda i tipi con attacco a vite o a baionetta mentre in figura 4.30 abbiamo le caratteristiche di lampade alogene per bassissima tensione.

Potenza ⁽¹⁾ W	Flusso luminoso (lm)	Altre principali caratteristiche
60	830	Durata: 2000 ore Resa dei colori: Ra = 100 Temperatura di colore: $T_k = 3000$ K Luminanza: 500-2000 cd/cm ² Tempo di accensione: circa 0 Tempo di riaccensione ⁽²⁾ : circa 0 Attacco: R 7s-15 (uno spinotto ad ogni estremità) Apparecchiature ausiliarie: nessuna Variazioni in funzione della tensione ⁽³⁾ — del flusso luminoso: - 15%; + 17% — della potenza assorbita: - 8%; + 8% — della durata: + 75%; - 40% Decadimento del flusso luminoso ⁽⁴⁾ : 12% Posizione di funzionamento: + 15° - 15° fra asse lampada e piano orizzontale
100	1650	
150	2600	
200	3200	
300	5000	
400	7000	
500	9500	
750	16500	
1000	22000	
1500	33000	
2000	44000	

figura 4.28

Potenza ⁽¹⁾ W	Flusso luminoso (lm)	Altre principali caratteristiche
60	780	Durata: 2000 ore Resa dei colori: Ra = 100 Temperatura di colore: $T_k = 3000$ K Luminanza: da 3 a 500 cd/cm ² , a seconda della finitura dell'ampolla (satinata o trasparente) Tempo di accensione: 0 Tempo di riaccensione ⁽²⁾ : 0 Attacco: E 27 (a vite) o B15 (a baionetta) Apparecchiature ausiliarie: nessuna Variazioni in funzione della tensione ⁽³⁾ — del flusso luminoso: - 15%; + 17% — della potenza assorbita: - 8%; + 8% — della durata: + 75%; - 40% Decadimento del flusso luminoso ⁽⁴⁾ : 12% Posizione di funzionamento: qualsiasi
75	1000	
100	1350	
150	2400	
250	4000	

figura 4.29

Potenza W	Flusso luminoso (lm)	Altre principali caratteristiche
20	350	Durata: 2000 ore Resa dei colori: Ra = 100 Temperatura di colore: $T_k = 3000$ K Luminanza: da 3 a 500 cd/cm ² Tempo di accensione: circa 0 Tempo di riaccensione ⁽²⁾ : circa 0 Attacco: GY 6, 35 (bispina) Apparecchiature ausiliarie: trasformatore Variazioni in funzione della tensione ⁽³⁾ — del flusso luminoso: - 15%; + 17% — della potenza assorbita: - 8%; + 8% — della durata: + 75%; - 40% Decadimento del flusso luminoso ⁽⁴⁾ : 12% Posizione di funzionamento: qualsiasi
35	650	
50	1000	
75	1350	
100	2300	

figura 4.30

Per quanto riguarda le lampade ad alogeni, una delle proposte della Osram sono le lampade in tecnologia IRC (infra-red coating) a recupero termico, che uniscono economia di servizio all'elevata intensità luminosa. Ecco le caratteristiche fornite dal produttore:

- Durata doppia di quella dei prodotti standard: fino a 4.000 ore ;
- L'intensità luminosa e l'apparenza cromatica rimangono costanti per l'intera durata della lampada: i gruppi di lampade installate forniscono sempre una luce uniforme anche quando le lampade vengono sostituite una alla volta ;
- Drastica riduzione dell'effetto scolorimento grazie alla tecnologia UV-FILTER del vetro al quarzo utilizzato per il bulbo.



DECOSTAR® IRC
Lampada a bassissima tensione con riflettore dicroico

- Fino al 65% di risparmio di energia elettrica³⁾
- 4.000 ore di durata media
- Intensità luminosa e temperatura di colore costanti per l'intera durata della lampada grazie allo speciale rivestimento longlife del riflettore
- Colorazione blu della luce emessa sul retro del riflettore costante per tutta la durata
- Tecnologia UV-FILTER
- Vetro di protezione integrato per l'impiego in apparecchi di illuminazione privi di vetro di protezione in conformità alla norma IEC 60598-1
- Completamente regolabile
- Temperatura di colore 3100 K
- Riduzione significativa delle emissioni CO₂³⁾ grazie al minor consumo di energia elettrica



Advanced Technology

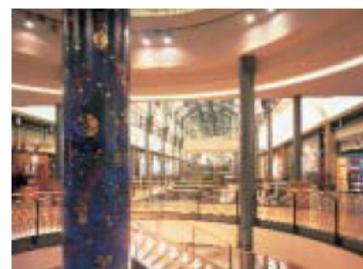


HALOSPOT® AR111 IRC
Lampada ad alogeni a bassissima tensione con riflettore incorporato

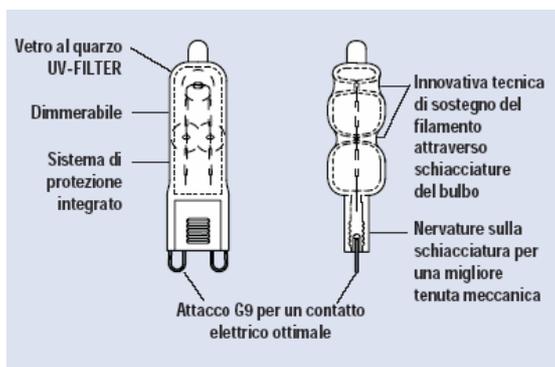
- Fino al 48% di risparmio di energia elettrica³⁾
- Nuovo riflettore Advanced Technology:
 - illuminazione ottimizzata
 - minor dispersione della luce
- Tecnologia a bassa pressione per l'impiego in apparecchi privi di vetro di protezione in conformità a IEC 60598-1
- Unità lampada/riflettore ottimizzata fotometricamente
- Protezione antiabbagliamento integrata
- Bulbo in quarzo UV-FILTER
- Completamente regolabile
- Temperatura di colore 3000 K
- Riduzione significativa delle emissioni CO₂³⁾ grazie al minor consumo di energia elettrica

DECOSTAR® IRC	
35W	20W IRC
50W	35W IRC
65W	50W IRC

HALOSPOT® AR111 IRC	
50W	35W IRC
75W	50W IRC
100W	65W IRC



Nella pagina seguente (tratta sempre dal catalogo Osram) possiamo notare come la ricerca sia sempre in movimento nel settore della sorgenti luminose, per quanto riguarda la qualità della luce emessa, ma anche per tutte le caratteristiche meccaniche (importanti per una lunga durata della lampada) annesse alla sorgente luminosa.



Quali sono i vantaggi della tecnologia pinch?

La tecnologia "pinch" utilizzata da OSRAM aumenta efficacemente la durata delle lampade ad alogeni HALOPIN®, in particolare nelle installazioni soggette a forti vibrazioni. Infatti, grazie alla innovativa tecnica di sostegno attraverso le schiacciate del bulbo, HALOPIN® garantisce una elevata resistenza meccanica.

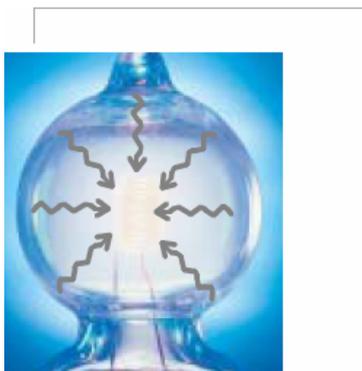


HALOPIN® COMPACT Lampada a tensione di rete con attacco G9

- Disponibile nelle potenze 25W e 40W nelle versioni chiara e smerigliata
- Tecnologia Pinch
- Più corta di 8 mm rispetto alla HALOPIN® standard
- Attacco G9 per un contatto elettrico ottimale
- Completamente regolabile
- Temperatura di colore di 2900 K
- Durata media 2.000 ore
- Tecnologia UV-FILTER
- Possibilità di impiego in apparecchi privi di vetro di protezione in conformità alla norma IEC 60598-1



Ogni produttore adotta delle particolari tecnologie per lo sviluppo ed il miglioramento della qualità delle proprie sorgenti luminose, nella pagina seguente possiamo avere un piccolo accenno delle tecnologie di casa Osram.



Il principio IRC nel dettaglio

Il segreto delle innovative lampade ad alogeni nella tecnologia IRC sviluppata da OSRAM è il principio del recupero termico. Lo speciale rivestimento IRC (Infra-Red Coating) riflette il calore sul filamento anziché disperderlo nell'ambiente circostante insieme alla luce. In questo modo è necessario somministrare dall'esterno una minor quantità di energia per portare il filamento alla sua temperatura di funzionamento. Come risultato, l'efficienza aumenta, una caratteristica ulteriormente migliorata dal gas di riempimento del bulbo, a base di xeno e, nelle DECOSTAR® IRC, dal vetro di protezione con rivestimento antiriflesso.



All'interno di una lampada ad alogeni ad alta pressione si verificano forti turbolenze causate dal processo di convenzione



Nelle lampade a bassa pressione il calore e i gas si muovono per diffusione in modo tranquillo e uniforme.

Tecnologia a bassa pressione

All'interno di una lampada ad alogeni convenzionale la pressione di funzionamento può raggiungere i 25 bar. Nelle lampade ad alogeni al tungsteno in tecnologia a bassa pressione tale valore non supera invece i 2,5 bar. Per questo le lampade a bassa pressione possono essere utilizzate in apparecchi privi di vetro di protezione in conformità alla norma IEC 60598-1. Come spiegato nell'illustrazione, i differenti valori di pressione determinano anche differenti comportamenti nei gas di riempimento. Come risultato la tecnologia a bassa pressione offre ulteriori vantaggi:

- Il flusso luminoso rimane costante per l'intera durata della lampada
- Le morti premature si riducono drasticamente
- Si riducono anche le perdite di potenza attraverso i gas di riempimento



Tecnologia "Pinch"

Questa tecnologia, un processo completamente nuovo per la produzione di lampade ad alogeni a tensione di rete, prevede il fissaggio del sottile filamento metallico, estremamente sensibile, al bulbo. Ciò garantisce una elevata resistenza meccanica. Il risultato è una maggiore durata anche in caso di vibrazioni o shock improvvisi. Il sistema di protezione integrato assicura inoltre che la lampada si spenga immediatamente in caso di situazioni critiche. La lampada può essere utilizzata in apparecchi di illuminazione non schermati in conformità alla norma IEC 60598-1.

4.2.2 Lampade ad alogeni con riflettore incorporato

Si producono attualmente lampade ad alogeni derivate dalle note PAR (acronimo di Parabolic Aluminized Reflector) ad incandescenza, perfettamente intercambiabili con queste: offrono luce convogliata in fasci con apertura di 10° (spot) oppure di 30° (flood). Sono costituite da un filamento montato con precisione nel centro ottico di uno specchio parabolico. La minima potenza

disponibile è di soli 40 W (PAR 16 con attacco a vite E14), la massima 100 W (PAR 38 con attacco a vite E27). Le PAR ad alogeni offrono una buona uniformità nella distribuzione del flusso all'interno del cono luminoso, prerogativa che consente di illuminare senza striature o disomogeneità nell'alone luminoso proiettato. Il bulbo in vetro pressato è composto da due parti: la coppa riflettente parabolica rivestita sulla faccia interna con polveri di alluminio e il vetro rifratore frontale. Questo vetro può essere composto da elementi prismatici lenticolari (versione flood con apertura di 30°) o da elementi rifrangenti concentranti (versione spot con apertura di 10°). La durata è di 2500 ore, due volte e mezzo quella delle incandescenti. Si producono lampade ad alogeni con ottica incorporata in versioni per alimentazione a 12 V e a 24 V (bassissima tensione) con potenze disponibili di 20 W, 35 W, 50 W, 75 W, 100 W, bulbo in vetro di quarzo chiaro, perfettamente trasparente, o smerigliato per un effetto luminoso più soffuso (figure 2.1.22 e 2.1.23). L'efficienza luminosa dei modelli alimentati a bassissima tensione è di norma maggiore dell'efficienza delle lampade ad alogeni alimentate a bassa tensione. La coppa riflettente saldata al bulbo in quarzo è costruita in alluminio o in vetro diecrico (il 60% dell'irraggiamento termico viene disperso verso il retro della lampada) a superficie interna multifaccettata con sistema computerizzato per varie ampiezze del fascio (10°,24°,38°,60°). In alcuni modelli il bulbo funge da barriera alle radiazioni ultraviolette. In taluni modelli, ai fini della sicurezza d'uso, il bulbo in quarzo è protetto da un vetro frontale con trattamento antiriflesso sulle due facce. Questo trattamento conferisce al vetro un' elevata capacità di trasmettere la luce. Il vetro frontale semplifica notevolmente la manutenzione perchè preserva sia il bulbo che l' ottica dall'aggressione della polvere e in genere delle sostanze inquinanti. Può fungere, inoltre, anch'esso da barriera anti-UV. L'evoluzione tecnologica ha portato recentemente a vari perfezionamenti del prodotto riguardanti in particolare:

- la sicurezza di impiego;

- la protezione degli oggetti illuminati contro le radiazioni UV.

In figura 4.31 possiamo vedere i dati dimensionali di una lampada a ciclo di alogeni con parabola dielettrica incorporata.

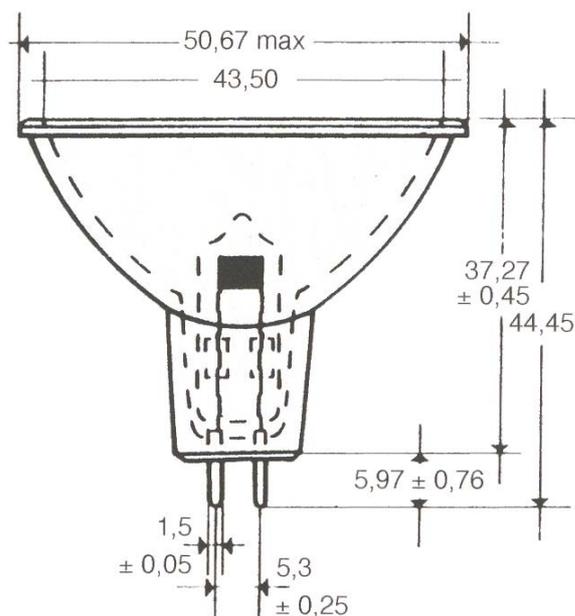


figura 4.31

4.2.3 Lampade fotografiche a lampo

Nella categoria delle lampade elettriche ad incandescenza possono farsi rientrare anche le lampade “a lampo” usate per la fotografia. Sono costituite da un involucro di vetro nel cui interno viene posta una certa quantità di fili del diametro di circa 30μ di una lega di alluminio e magnesio in ambiente di ossigeno puro alla pressione di poco meno di una atmosfera. L'accensione è ottenuta riscaldando un filamento, pure sistemato nell'involucro, attraverso il quale è fatta passare la corrente fornita da una piccola batteria d'accumulatori. Le proprietà di una lampada “lampo” sono rappresentate dalla caratteristica flusso-tempo (figura 4.32) :

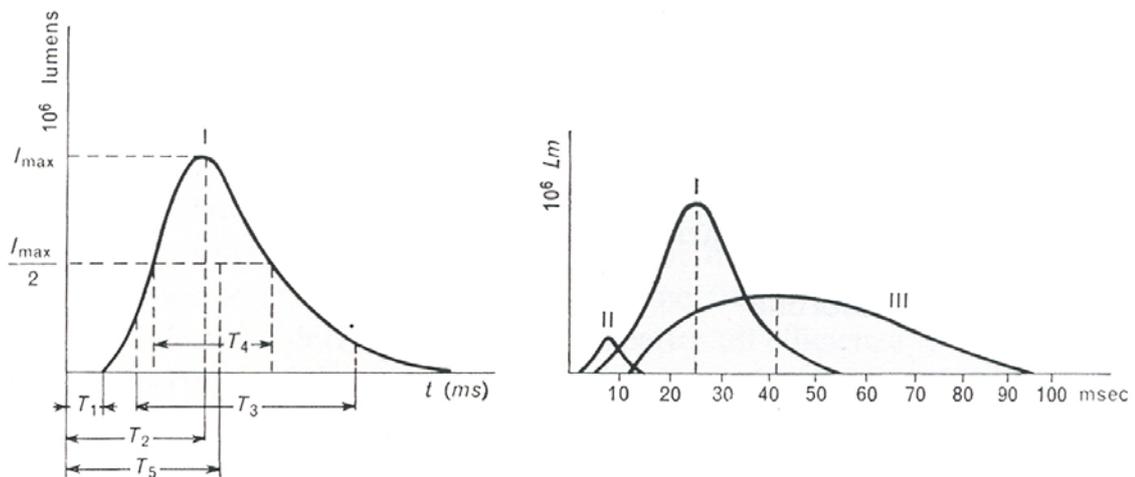


figura 4.32

Questa curva infatti permette di rilevare, oltre che il flusso istantaneo massimo, i diversi “tempi”, che caratterizzano le modalità d'impiego della lampada, specialmente nei riguardi della sincronizzazione con l'otturatore dell'apparecchio fotografico. Questi sono il “tempo di contatto” T_1 che è l'intervallo tra la chiusura del circuito e l'inizio della combustione; il “tempo di massimo” T_2 pari all'intervallo tra gli istanti di chiusura del circuito e di emissione del flusso massimo; i tempi T_3 e T_4 che rappresentano, rispettivamente il periodo durante il quale il flusso emesso è compreso, tra il 5 % e il 95 % del flusso massimo, e quello durante il quale il flusso istantaneo si mantiene al di sopra del 50% del flusso massimo. Vengono prodotte tre classi di lampade che si differenziano per la forma della caratteristica che può essere normale ($T_2 \sim 25$ msec, $T_4 \sim 20$ msec), piatta ($T_2 \sim 40$ msec, $T_4 \sim 50 \div 60$ msec), a cuspidi ($T_2 \sim 10$ msec, $T_4 < 10$ msec). Nella tabella di figura 4.33 vediamo alcune caratteristiche di lampade fotografiche a lampo :

Energia luminosa	Flusso istant. massimo	Temperatura colore	Tempo di massimo (T_2)	Tempo di massimo (T_3)	Lunghezza
lu/sec	lu	°K	msec	msec	mm
4.900	830	3.800	5	10	65
7.300	740	3.800	13-15	25	45
16.000	1.000	3.800	20	40	45
70.000	4.400	3.800	20	40	120
100.000	5.500	3.800	30	50-60	150
5.300	300	6.000	12	25	35
11.500	610	6.000	20	45	45
16.200	1.100	6.000	20	50-60	100
48.200	2.600	6.000	30	60-80	150

figura 4.33

4.3 Lampade a scarica

Le lampade a scarica attuali traggono la loro origine più lontana dalle conoscenze sperimentali possedute fin dai primi decenni del secolo passato riguardo ai fenomeni luminosi che si manifestano tra gli elettrodi posizionati alle opposte estremità di un tubo (di vetro o di quarzo) nel quale sia contenuto un aeriforme, quando agli elettrodi si applichi una conveniente differenza di potenziale. Il principio di funzionamento delle lampade a scarica differisce sostanzialmente da quello delle lampade ad incandescenza. L'emissione di luce si manifesta, quando un elettrone di un atomo eccitato passa da un livello energetico superiore ad uno inferiore. Questo processo è accompagnato dalla emissione di un fotone la cui energia è uguale alla differenza dei due livelli energetici:

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Quando un atomo si trova allo stato stabile, tutti gli elettroni occupano i singoli livelli permessi dal modello quantistico allo stato energetico più basso. Il numero e l'energia dei singoli livelli sono delle caratteristiche dell'elemento. Se

all'atomo si conferisce una energia sufficiente che rende possibile la transizione di un elettrone ad un livello energetico superiore, lo stato dell'atomo è eccitato. Il ritorno allo stato fondamentale è accompagnato dall'emissione di un 1 fotone e la durata del processo è dell'ordine di 10^{-5} s. Gli elettroni dell'orbita esterna necessitano di una energia minore per una transizione e se questa è sufficientemente elevata l'elettrone viene allontanato definitivamente dall'atomo con la formazione di un ione positivo ed un elettrone libero. Questo processo di ionizzazione richiede una energia che varia da elemento ad elemento. Volendo utilizzare questi fenomeni per la produzione di luce, essendo specifici i livelli energetici, deve essere scelto un elemento che abbia sia le proprietà fisiche generali che le transizioni adatte per la produzione di luce. Gli elementi principali che costituiscono una lampada a scarica sono il tubo di scarica di vetro o quarzo nel quale sono inseriti agli estremi gli elettrodi, tra i quali si applica una differenza di potenziale. Nell'interno del tubo è presente un gas e/o un vapore metallico. La differenza di potenziale, applicata tra catodo e anodo, crea un campo elettrico lungo il tubo che accelera gli elettroni emessi dal catodo e quelli prodotti dalla scarica. Gli elettroni accelerati urtano gli atomi, presenti allo stato gassoso e provocano sia la ionizzazione che la eccitazione alla quale segue il decadimento con emissione di fotoni. La corrente elettronica generata in questi processi è principalmente raccolta all'anodo; infatti gli ioni positivi, a causa della maggiore massa sono più lenti e contribuiscono solo per il 0.1-1% alla corrente complessiva prodotta nella lampada.

Vediamo l'andamento della caratteristica corrente-tensione della scarica in un gas (figura 4.34) :

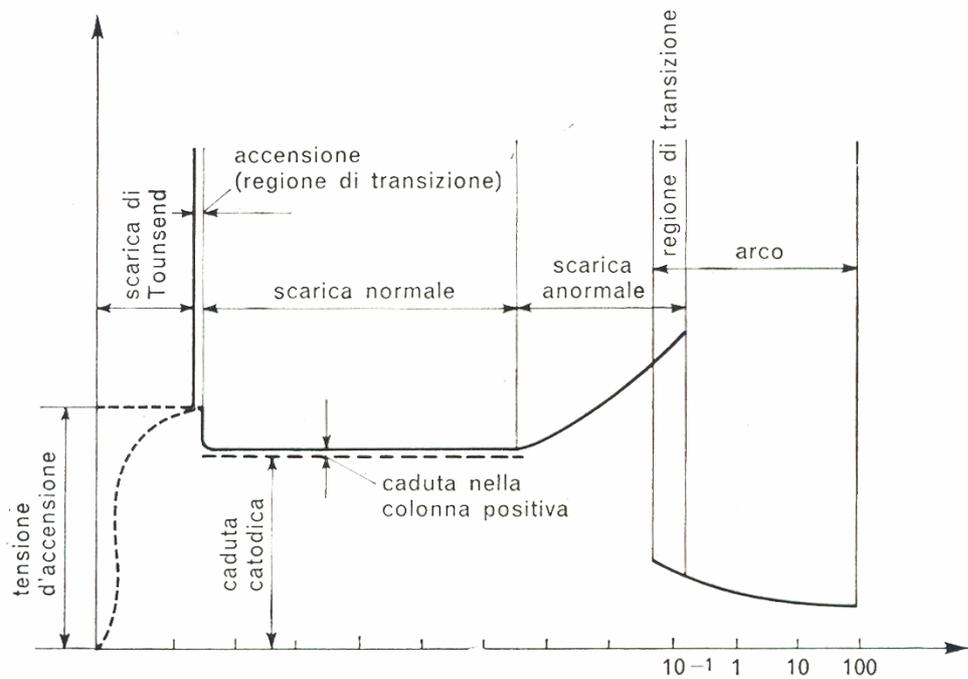


figura 4.34

Nella figura 4.35 è rappresentato come appare un tubo durante la scarica normale (vedi anche figura 4.34) e come, lungo il tubo stesso, si distribuisce la caduta di potenziale disponibile agli elettrodi e l'intensità del campo elettrico:

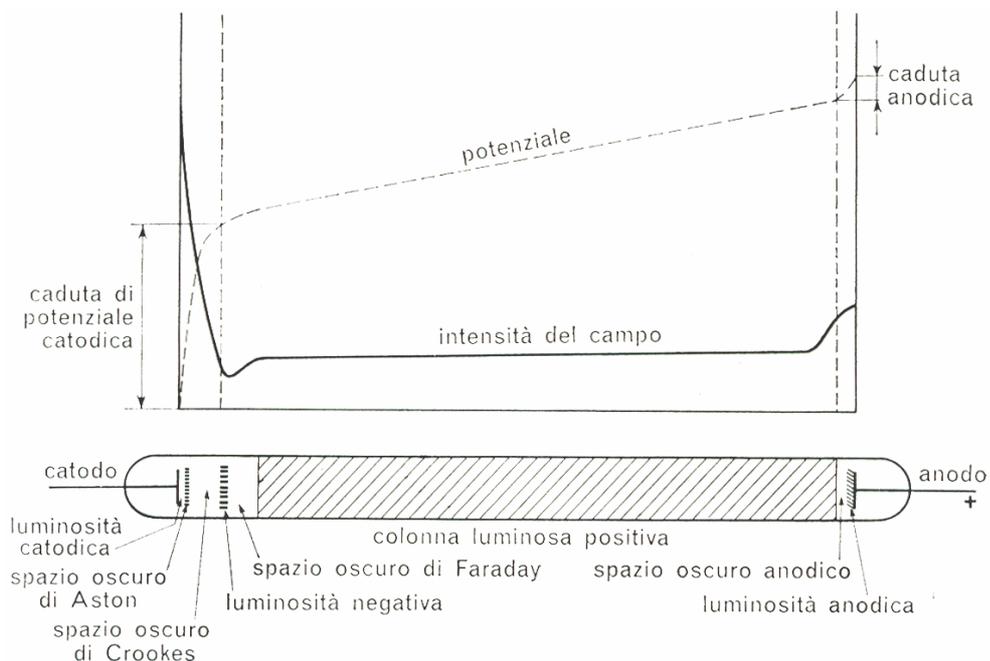


figura 4.35

Quindi possiamo vedere che la caduta di tensione tra anodo e catodo non è uniforme, ma varia nelle diverse zone, di cui alcune appaiono luminose altre

oscuere. La zona di maggiore interesse è la colonna positiva nella quale si riscontra la maggiore luminosità. Per questa ragione si fa in modo che occupi la maggior parte della lunghezza della lampada, determinando la caduta di potenziale più forte. Poiché la caduta di potenziale nell'intervallo della colonna positiva è relativamente bassa rispetto alla caduta totale e poiché la caduta catodica è costante a parità di altre condizioni, risulta conveniente costruire tubi lunghi perché con essi si ottengono efficienze specifiche più elevate. La maggior distanza tra gli elettrodi che si verifica di conseguenza richiederebbe un grosso aumento della tensione di accensione. Per ovviare a questo inconveniente si usa far ricorso ad artifici diversi, tra questi l'impiego dell'elettrodo ausiliario (figura 4.36) consistente nel disporre un terzo elettrodo *C* in prossimità dell'elettrodo principale *B* e connesso all'altro elettrodo principale *A* per mezzo di una resistenza *R*. Al momento dell'avviamento la scarica si stabilisce con facilità tra l'ausiliario *C* e l'elettrodo principale *B* che sono molto vicini. Per effetto della ionizzazione che viene così a prodursi, la scarica si stabilisce successivamente tra i due elettrodi principali mentre essendo la resistenza del tubo assai piccola rispetto alla resistenza *R*, l'elettrodo ausiliario risulta praticamente disalimentato. Ci sono anche altri metodi che non saranno trattati come il dispositivo di avviamento con banda conduttrice, oppure il dispositivo di avviamento per risonanza.

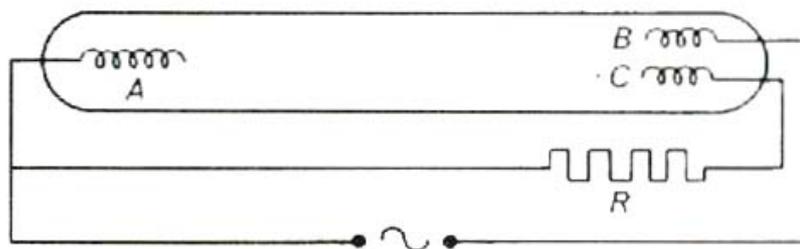


figura 4.36

Infine può essere utilizzato il riscaldamento degli elettrodi (figura 4.37), che ha lo scopo di facilitare l'emissione di elettroni da parte di questi, si realizza in maniera diretta, facendo passare la corrente di riscaldamento attraverso gli

elettrodi stessi oppure in maniera indiretta ponendo gli elettrodi, a cui si dà una forma cilindrica, al centro dell'elica che costituisce l'elemento riscaldante percorso dalla corrente. Il riscaldamento è applicato solo per il tempo necessario ad innescare la scarica: questa è poi sufficiente da sola a mantenere gli elettrodi nelle condizioni necessarie perché l'emissione di elettroni si mantenga.

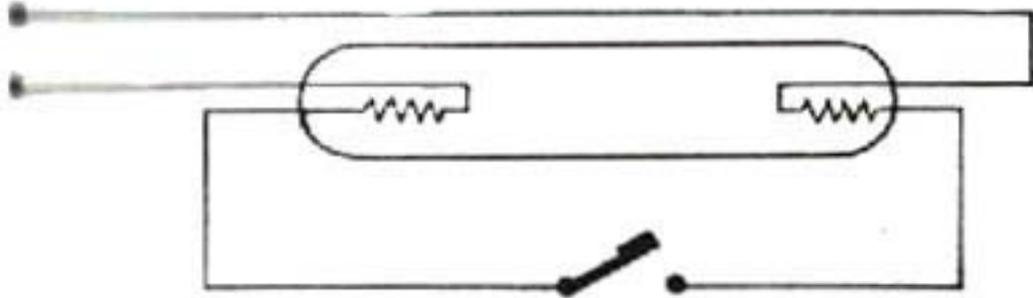


figura 4.37

Nella figura 4.38 vediamo una serie di foto di lampade a scarica:



figura 4.38

4.3.1 Lampade fluorescenti

Sono lampade a scarica in gas a bassa pressione e rappresentano il tipo più diffuso di lampade a scarica per illuminazione di interni. Sono costituite da un tubo di vetro contenente mercurio e gas a bassa pressione, ricoperto internamente con polveri fluorescenti (sono dei composti cristallini inorganici dotati di caratteristici difetti reticolari, nei quali sono incorporati piccolissime quantità di atomi estranei a quelli che costituiscono la matrice). La luce viene prodotta dallo scoccare di un arco tra elettrodi di tungsteno collocati all'interno del tubo. L'arco eccita gli atomi di mercurio che generano di conseguenza energia radiante principalmente nel campo dell'ultravioletto. A sua volta stimolato da questa energia, il fosforo del rivestimento interno del tubo emette luce convertendo la radiazione ultravioletta in luce visibile. La composizione delle polveri di rivestimento determina l'indice generale di resa del colore e la temperatura di colore.

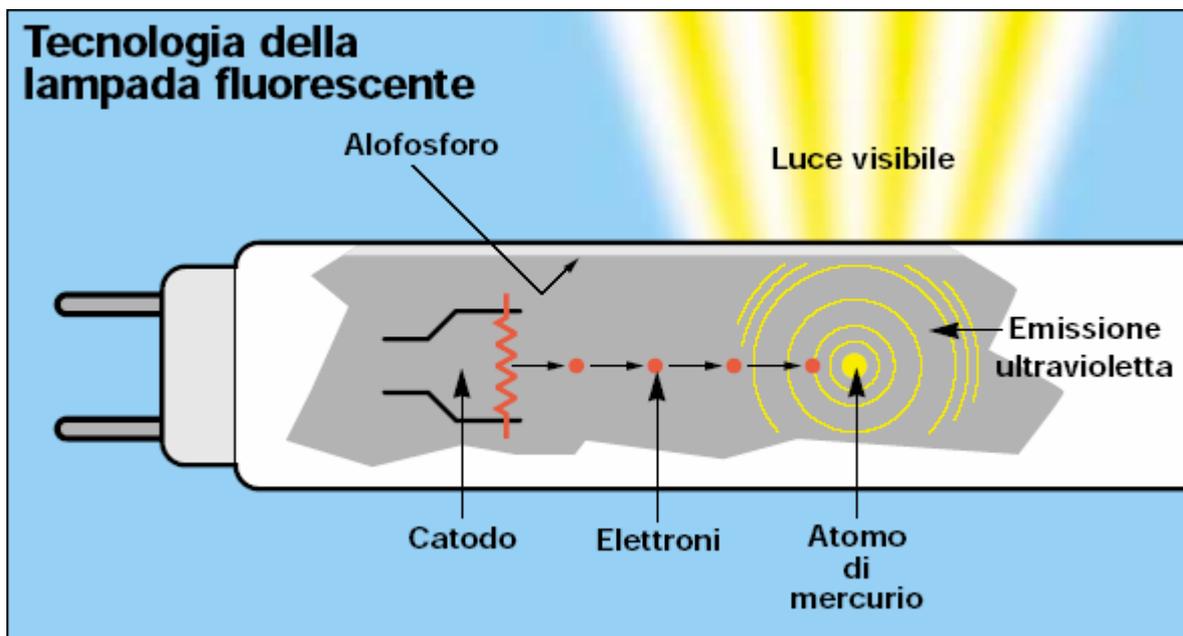


figura 4.39

E' indispensabile che il tubo di scarica abbia un consistente rapporto lunghezza-diametro, in modo tale che le perdite di potenza nelle regioni estreme (catodica e anodica) risultino una percentuale contenuta dell'energia totale assorbita dalla lampada. Le lampade fluorescenti necessitano di apparecchiature ausiliarie per il

loro funzionamento e, nel caso di apparecchiature di tipo induttivo, di un condensatore per il rifasamento della corrente assorbita. Secondo il tipo di elettrodi si distinguono: *lampade a catodo caldo*, in cui gli elettrodi sono costituiti da una spirale di tungsteno attivata da un rivestimento di ossidi alcalino-terrosi, portata ad incandescenza; in condizione di regime la stessa corrente di scarica mantiene incandescente il filamento, mentre per provocare l'innesco si impiegano opportuni pre-riscaldatori costituiti da *starter* in serie col filamento; e *lampade a catodo freddo*, in cui l'emissione di elettroni è prodotta da un alto potenziale agli elettrodi. In questo caso, essendo la caduta catodica superiore a quella delle lampade a catodo caldo, l'efficienza risulta inferiore. La vita delle lampade fluorescenti non è influenzata dal numero di inneschi e vengono perciò usate quando le accensioni e spegnimenti sono molto frequenti, come nel caso delle insegne luminose. Il colore della luce emessa dai tubi fluorescenti dipende dai tipi di fosfati usati: silicato di zinco per il verde, tungstato di calcio per il blu, borato di cadmio per il rosa, fosfati di calcio per il bianco, a cui si aggiungono mescolanze di altre polveri.

Tra i prodotti della Osram rientrano le lampade T8 LUMILUX PLUS, che utilizzano uno speciale rivestimento trifosforo per controllare con precisione la temperatura di colore e l'indice di resa cromatica. Le lampade fluorescenti trifosforo dispongono di un secondo rivestimento di fosfori sopra una base di alofosforo. Inoltre assicurano la massima efficienza di sistema quando vengono impiegate con alimentatori elettronici. Questa combinazione è vantaggiosa sul piano del risparmio di energia.

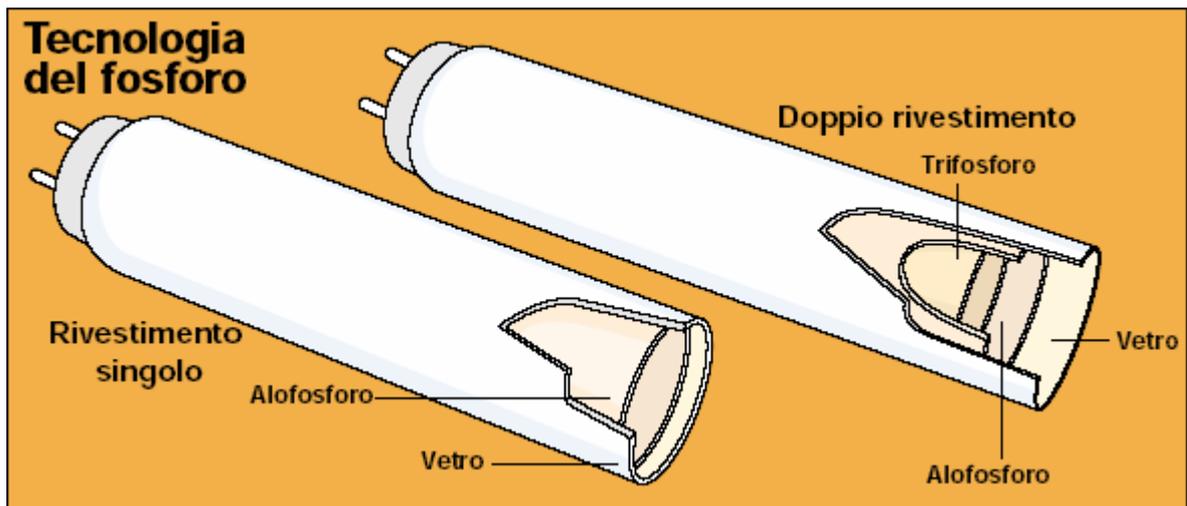


figura 4.40

I principali tipi di lampade fluorescenti sono:

- *Fluorescenti compatte* : queste lampade si caratterizzano per la riduzione di tutti gli ingombri delle componenti funzionali, ovvero per la loro miniaturizzazione. Sono lampade dell'ultima generazione hanno un tubo di scarica di diametro ridotto (da 10 a 15 mm) ripiegato 2 o più volte, e uno zoccolo di plastica che contiene, in alcune versioni, un alimentatore convenzionale o elettronico. Queste lampade hanno forme diverse e l'attacco è a vite, in quanto la lampada può sostituire direttamente quelle ad incandescenza. L'efficienza del sistema lampada-alimentatore è dell'ordine dei 50 lm/W per le lampade con alimentatore ferromagnetico e 60 lm/W (circa cinque volte superiori a quelle delle lampade ad incandescenza) per quelle con alimentatore elettronico con una durata media di circa 10000 ore.

Potenza ⁽¹⁾ W	Flusso luminoso (lm)	Altre principali caratteristiche
5	250	Durata: circa 5000 ore
7	400	Resa dei colori: Ra = 85 i primi tre gruppi; circa 95 il quarto gruppo
9	600	Temperatura di colore: T _k = da 2700 K a 5400 K
11	900	Luminanza: da 2 a 6 cd/cm ²
10	600	Tempo di accensione: circa 0
13	900	Tempo di riaccensione ⁽²⁾ : circa 0
18	1200	Attacco: a 2 o 4 spine ad una sola estremità; di tipo differente per i vari gruppi a seconda del tipo di alimentatore
26	1800	Apparecchiature ausiliarie: alimentatore, condensatore oppure alimentatore elettronico ⁽³⁾
18	1200	Variazioni in funzione della tensione ⁽⁴⁾
24	1800	— del flusso luminoso: - 4%; + 5%
36	2900	— della potenza assorbita: - 4%; + 5%
40	3500	— della durata: trascurabile
55	4800	Decadimento del flusso luminoso ⁽⁵⁾ : 30%
18	750	Posizione di funzionamento: qualsiasi
24	1200	
36	1900	

figura 4.41

Sempre dal catalogo Osram possiamo vedere il data-sheet di uno dei prodotti in commercio, la nuova CIRCOLUX® EL. Questa lampada utilizza un tubo fluorescente di soli 16 mm di diametro alimentato elettronicamente per ottenere, nella sua categoria, una ottima quantità di luce ed efficienza. E' una sorgente luminosa con attacco E27 capace di generare praticamente la stessa quantità di luce di una lampada ad incandescenza da 150W con un consumo di 24W.

NUOVA CIRCOLUX® EL 24W IN TECNOLOGIA T5 - CARATTERISTICHE

Denominazione	Lampada fluorescente compatta in tecnologia T5 con alimentatore elettronico integrato e attacco E27	
Potenza	24W	
Flusso luminoso	1.700 lumen	
ECOLABEL	Classe A	
Alimentazione	220-240V, 50-60Hz	
Durata	15.000 ore	
Tonalità di luce	LUMILUX® PLUS 41-827 INTERNA, 21-840 bianchissima	
Diametro del tubo	16 mm	
Diametro della lampada	225 mm	
Altezza totale	99 mm	
Peso	170 gr.	
Codice EAN/ordinazione	Tonalità di luce INTERNA:	4050300626628
	Tonalità di luce bianchissima:	4050300623603
Imballo	Astuccio e blister 3D	
Unità di imballo	4 astucci/blister	

L'EVOLUZIONE DELLA SPECIE

Con CIRCOLUX® EL nasce nel 1983 la prima lampada fluorescente compatta con alimentatore elettronico integrato e attacco E27. Per OSRAM, che sceglie senza esitazioni la strada dell'elettronica per le lampade a risparmio di

energia, è l'inizio di un lungo percorso di successo. Da allora, la gamma OSRAM DULUX® EL e CIRCOLUX® EL è diventata un vero e proprio fenomeno dell'illuminazione moderna, grazie anche ai continui miglioramenti tecnologici

che puntano alla riduzione delle dimensioni e all'estensione della durata e delle possibili applicazioni.



Tra le caratteristiche di questo tipo di lampade abbiamo: minor quantità di calore Prodotta, traducibile anche in maggior sicurezza, infatti mentre la superficie di una lampadina ad incandescenza convenzionale può raggiungere temperature di 100°C, quella di una DULUX® EL non supera mai i 70 °C.

- *Fluorescenti lineari* : queste lampade sono costituite da un tubo rettilineo o forgiato a U o a cerchio. Le più diffuse sono il tipo rettilineo, nei formati da 60, 120 e 150 cm di lunghezza e di 26 mm di diametro. Vengono prodotte con polverature diverse per ottenere varie temperature e rese di colore. L'efficienza luminosa varia da 65 lm/W a 95 lm/W in funzione della potenza e delle caratteristiche di resa del colore.

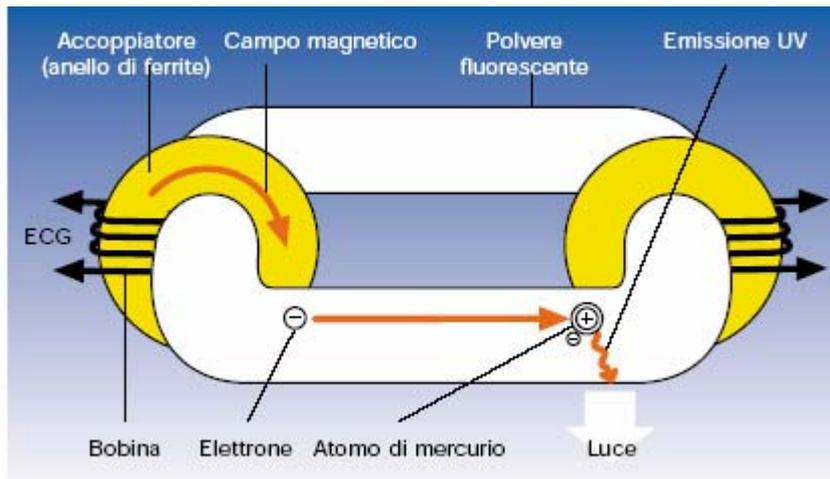
Per quanto riguarda il catalogo Osram, tra i tanti prodotti abbiamo le lampade della serie LUMILUX e della serie ENDURA, di cui possiamo vedere anche i data-sheets forniti dal produttore:

Le innovative lampade fluorescenti trifosforo LUMILUX® offrono considerevoli vantaggi rispetto alle lampade fluorescenti BASIC anche in termini di resa cromatica e qualità della luce.

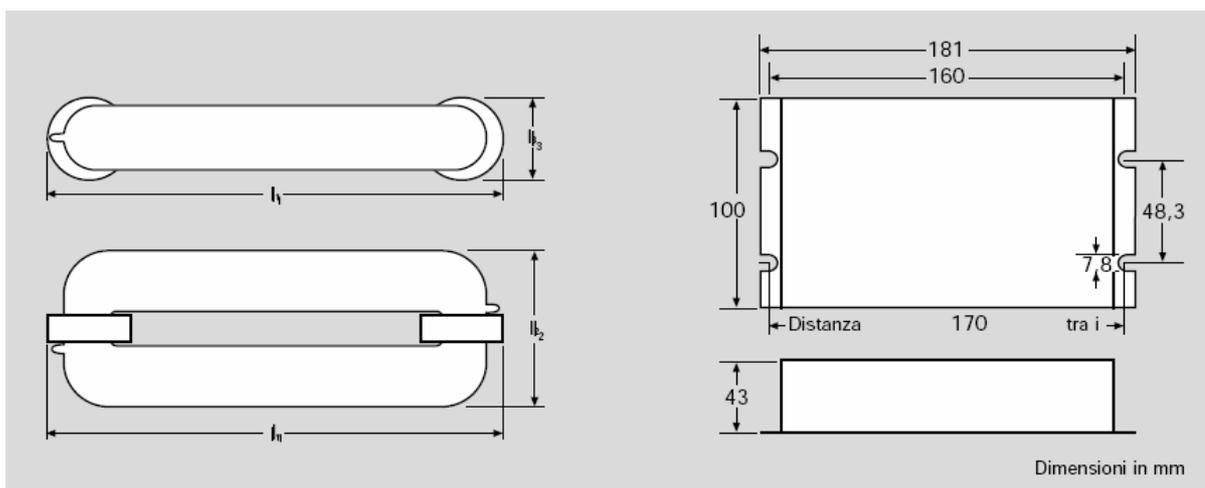


Confronto tra LUMILUX® e BASIC – diametro 26 mm Confronto tra alimentatore a basse perdite (LLG) e alimentatore elettronico (ECG)	L 58 W/20 BASIC con LLG	L 58 W/840 LUMILUX® con LLG	L 58 W/840 LUMILUX® con ECG*
Flusso luminoso (lm)	4600	5200	5000
Durata media (h)	13000	15000	20000
Durata utile (h)**	4000	10000	18000
Potenza del sistema (W)	65	65	54
Costo dell'energia elettrica (€/kWh)	0,17	0,17	0,17
Costo dell'energia elettrica nell'intera durata della lampada (€)	44,20	110,50	165,24
Nr. di lampade per ottenere lo stesso livello luminoso	1,13	1	1,04
Rapporto tra la durata utile	2,5	1	0,56
Prezzo unitario (€, listino prezzi Italia 2002, n. 2)	3,54	5,80	5,80
Sostituzione, 1 lampada (€)	8,85	5,80	3,25
Costi per punto luce – 1 lampada (€)	134,86	116,30	99,62
Costi per punto luce – 1 lampada (%)	134%	117%	100%
Sistema tipico con 20 lampade (€)	2697,20	2326,00	1992,40

Diversamente dalle lampade fluorescenti convenzionali, il prodotto OSRAM ENDURA non genera la luce partendo da una scarica tra due elettrodi. L'arco di scarica in gas non ha infatti inizio e fine ma avviene, senza utilizzo di elettrodi, in un "anello chiuso". L'energia è immessa nella lampada tramite un campo magnetico generato da due accoppiatori in ferrite posti all'esterno. Non ci sono quindi quei componenti soggetti ad usura che limitano la durata delle lampade fluorescenti tradizionali. Con una vita utile di 60000 ore ed una efficienza luminosa di 80 lm/W questo tipo di lampada è ideale nell'illuminazione di gallerie autostradali.



Principio di funzionamento di OSRAM ENDURA



Dimensioni in mm

DATI TECNICI

Tipo	Potenza nominale	Alimentatore elettronico	Tonalità di luce	Flusso luminoso	Lunghezza l ₁ *	Lunghezza l ₂ *	Lunghezza l ₃ *	Diametro
ENDURA 150 W	150 W	QT ENDURA 150	LUMILUX luce bianchissima LUMILUX tono caldo	12000 lm	414 mm	139 mm	72 mm	54 mm
ENDURA 100 W	100 W	QT ENDURA 100	LUMILUX luce bianchissima LUMILUX tono caldo	8000 lm	313 mm	139 mm	72 mm	54 mm
ENDURA 100 W	150 W	QT ENDURA 150	LUMILUX luce bianchissima LUMILUX tono caldo	11000 lm	313 mm	139 mm	72 mm	54 mm

4.3.2 Lampade a vapori di mercurio

La tecnologia delle lampade scarica ad alta intensità è simile a quella fluorescente. Si differenziano comunque da queste per le dimensioni e i pesi molto contenuti. Il piccolo tubo di scarica, protetto da un bulbo di vetro di sicurezza, le rende adatte in modo particolare per molti proiettori. All'interno del tubo riempito di gas, viene generato tra due elettrodi un arco che stimola la produzione di energia radiante. In questo caso comunque, una combinazione di fattori diversi contribuisce a produrre luce nello spettro visibile senza utilizzo di fosfori. Innanzitutto gli elettrodi (collocati alle estremità di un tubo di scarica sigillato) distano solo pochi centimetri e il gas contenuto nel tubo è ad alta pressione. Ciò consente all'arco di generare temperature estremamente elevate da far vaporizzare gli elementi metallici contenuti nel gas e di liberare grandi quantità di energia radiante nello spettro del visibile. Esistono tre tipi principali di lampade a scarica ad alta intensità: a vapori di mercurio, ad alogenuri metallici e al sodio. I nomi si riferiscono appunto agli elementi metallici presenti nel gas in cui scocca l'arco: da essi dipendono le differenti caratteristiche cromatiche e l'efficienza di lampada. La più vecchia tecnologia di scarica ad alta intensità è quella delle lampade a vapori di mercurio, che producono energia sia visibile che ultravioletta e richiedono un bulbo esterno in grado di filtrare la radiazione UV (il bulbo esterno è riempito da un gas inerte, in grado di trattenere le radiazioni ultraviolette). L'arco che si forma tra i due elettrodi all'interno del tubo ha caratteristica negativa ed è perciò necessario inserire un limitatore di corrente, costituito da una reattanza o da un trasformatore a forte impedenza. Il tubo di scarica è in grado di resistere all'elevata temperatura dei vapori, infatti la scarica produce il riscaldamento e l'evaporazione del mercurio, che a regime raggiunge una pressione di 300000 Pa. Di per se stessa una lampada a scarica a vapori di mercurio genera una luce bluastra ad elevata temperatura di colore con bassa resa cromatica. Per abbassare la temperatura di colore e riportare entro limiti accettabili la resa cromatica viene spesso utilizzato

un rivestimento di fosforo. Queste caratteristiche di colore risultano accettabili nelle applicazioni in esterni, dove però la scarsa efficienza luminosa rappresenta un punto debole.



La diffusione di queste sorgenti luminose si è quindi ridotta sensibilmente grazie allo sviluppo tecnologico che ha reso disponibili altri tipi di lampade a scarica ad alta intensità caratterizzate da un miglior coefficiente lm/W e migliori proprietà cromatiche. Inoltre, le lampade a scarica ad alta intensità richiedono un periodo di riscaldamento per produrre il flusso luminoso nominale: anche una momentanea perdita di potenza può rendere necessario il riavviamento del sistema e il riscaldamento, un processo che può richiedere anche alcuni minuti. Nelle applicazioni nelle quali l'illuminazione è importante ai fini della sicurezza, è spesso richiesto un sistema di emergenza. La gamma delle lampade a vapori di mercurio spazia da tagli di piccola potenza, utilizzati prevalentemente nell'illuminazione residenziale (50W, 80W) a tagli tipicamente previsti per l'illuminazione stradale o industriale (da 125W a 1000W).

In figura 4.42 vediamo una lampada a vapori di mercurio con la descrizione delle varie parti:

- 1) Supporto;
- 2) Bulbo;
- 3) Fosfori;

- 4) Collegamento elettrodi;
- 5) Tubo di scarica;
- 6) Elettrodo ausiliario;
- 7) Elettrodo principale;
- 8) Resistenza per l'innesco;
- 9) Attacco.

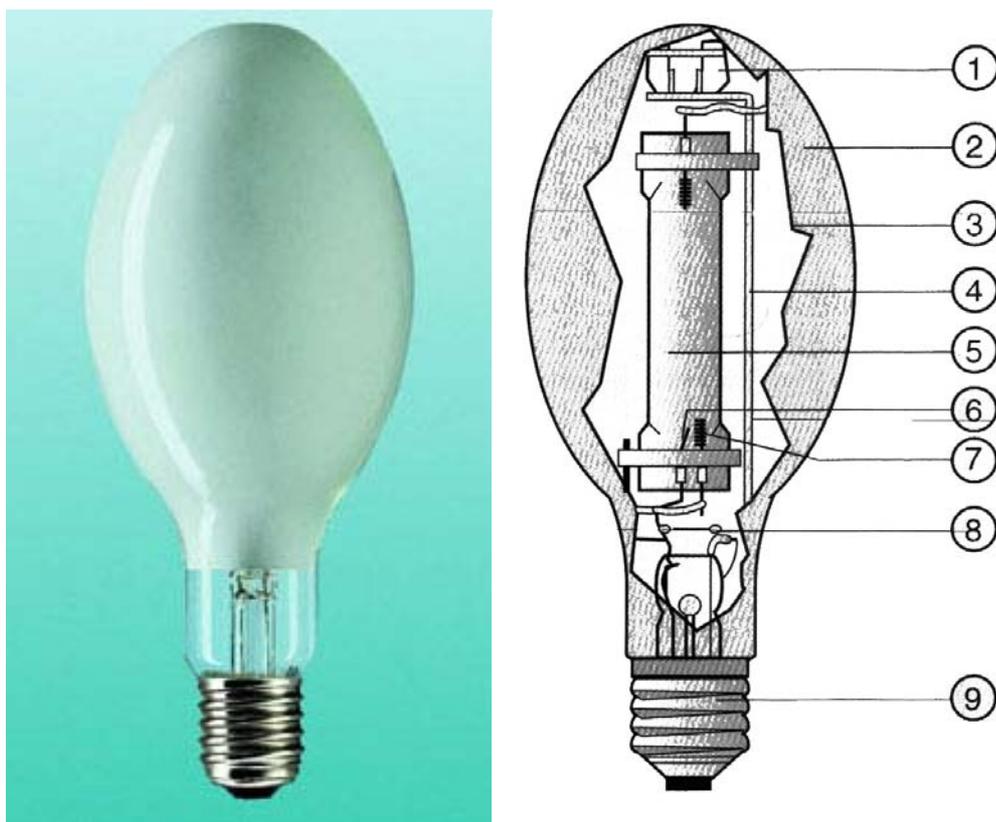


figura 4.42

Tabella 2.1.13 – Dati tecnici e prestazionali indicativi delle lampade a vapori di mercurio ad alta pressione.

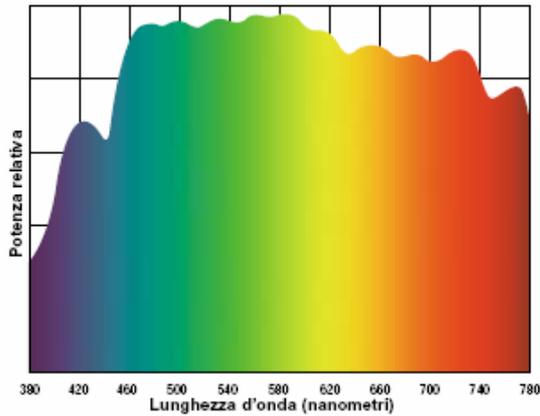
Tipo di sorgente	Dimensioni mm	Attacco	Tensione di alimentazione (V)	Potenza nominale (W)	Potenza assorbita (VA)	Flusso luminoso (lm)	Efficienza luminosa (lm/W)	Durata media (ore)	Temperatura di colore (K)	Indice di resa del colore (R_a)
Lampada a vapori di mercurio ad alta pressione – standard	130 × 55	E 27	230	50	58	1800	36	12.000	4200	40
– standard	183 × 75	E 40	230	125	136	6300	50	12.000	4200	40
– standard	390 × 165	E 40	230	1000	1045	5800	58	12.000	4200	40
– standard	156 × 70	E 27	230	80	89	3700	46	12.000	3300	50
– de luxe	226 × 90	E 40	230	250	266	13.000	52	12.000	3300	50
– de luxe	290 × 120	E 40	230	400	425	22.000	55	12.000	3300	50

figura 4.43

4.3.3 Lampade a vapori di alogenuri

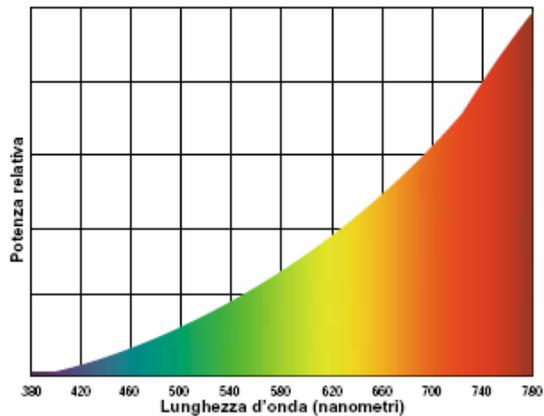
Queste lampade sono costruttivamente simili a quelle a vapore di mercurio e analogo è il principio di funzionamento: si differenziano per il tipo di elementi contenuti nel tubo di scarica e per la forma e la finitura dell'ampolla. Nel tubo di scarica delle lampade ad alogenuri, oltre al mercurio, vengono introdotti degli ioduri di sodio, di tallio e di indio. Vengono aggiunti metalli sotto forma di sali ioduri, perché i metalli al loro stato puro hanno una tensione di vapore troppo bassa (inferiore ai 0.1 mm di Hg) e impediscono così una produzione efficiente di radiazione visibile. Queste aggiunte migliorano la resa dei colori e aumentano l'efficienza luminosa, infatti queste sostanze emettono radiazioni distribuite lungo la banda delle radiazioni visibili in modo da riempire le lacune dello spettro del mercurio. Il grafico della distribuzione spettrale (figura 4.44) mostra con precisione la composizione cromatica di una determinata sorgente luminosa indicando il livello di energia presente in ciascuna lunghezza d'onda sull'intero spettro visibile. Il diagramma della distribuzione spettrale della luce solare a mezzogiorno, ad esempio, si presenta eccezionalmente bilanciato, con tutte le lunghezze d'onda della luce visibile presenti in quantità praticamente uguali. Logicamente un diagramma di questo tipo indica una eccezionale resa cromatica. Alcune lampade ad alogenuri metallici utilizzano rivestimenti di fosforo per migliorare ulteriormente le loro proprietà cromatiche. Oltre all'alimentatore, necessario per la stabilizzazione della scarica, queste lampade generalmente richiedono l'accenditore, che, all'atto dell'accensione, invia alla lampada impulsi di tensione dell'ordine da 4 a 5kV. Per i loro numerosi vantaggi, questo tipo di lampade sono molto usate per l'illuminazione d'interni di ambienti commerciali, in particolare quando soffitti molto alti richiedono grande potenza luminosa. I grafici di distribuzione spettrale che seguono sono relativi ai prodotti di casa Osram. In particolare possiamo notare le lampade POWERSTAR® HCI®-TT, particolarmente adatte per l'illuminazione urbana. Seguono poi, nella tabella di figura 4.45, i data-sheets di alcuni prodotti della suddetta linea della Osram.

Luce solare a mezzogiorno



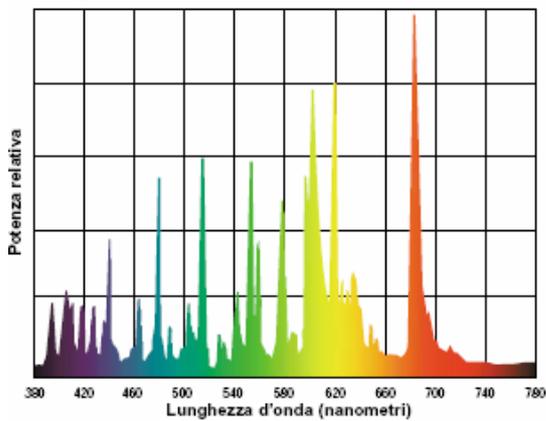
La distribuzione spettrale della luce solare a mezzogiorno mostra come si tratti di una sorgente luminosa ben bilanciata con tutte le lunghezze d'onda dello spettro visibile presenti in quantità praticamente uguali.

Incandescenza



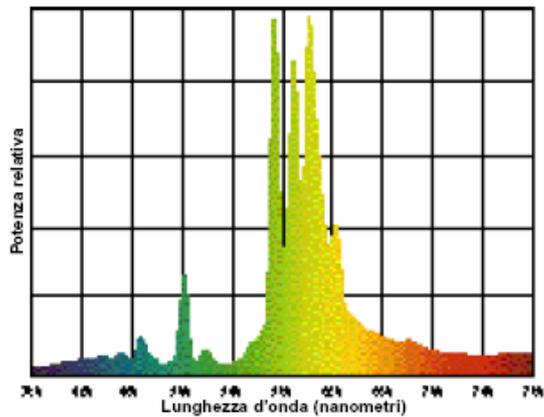
La distribuzione spettrale di una lampada ad incandescenza standard mostra una ridotta quantità di radiazione nella fascia bassa dello spettro. Ciò spiega perché questo tipo di lampada tenda a non rendere bene i colori di tonalità blu.

Alogenuri metallici POWERSTAR®



L'energia spettrale delle lampade ad alogenuri metallici è relativamente bilanciata ma esistono dei veri e propri "buchi". Per la maggior parte delle applicazioni comunque questi vuoti non sono significativi e non impediscono alle lampade di rendere i colori sorprendentemente bene.

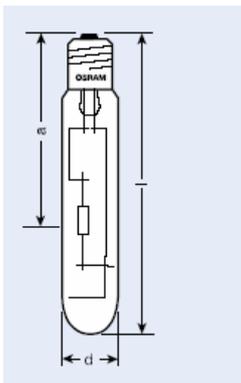
Sodio ad alta pressione VIALOX®



La curva dell'emissione spettrale di una lampada al sodio ad alta pressione mostra un'intensa concentrazione di energia spettrale nell'area gialla dello spettro. È ovvio che questa lampada non è in grado di rendere i colori con precisione.

figura 4.44





Caratteristiche	HCI*-TT 70 W/WDL	HCI*-TT 150 W/WDL
Codice EAN	4050300612348	4050300612225
Potenza	70 W	150 W
Tensione di lampada	90 V	97 V
Corrente di lampada	0.95 A	1.8 A
Flusso luminoso	6500 lm	14,000 lm
Efficienza luminosa	93 lm/W	93 lm/W
Temperatura di colore	3000 K	3000 K
Indice di resa cromatica R_a	83	85
Posizione di funzionamento	universal	universal
Attacco	E27	E40
Durata media	9000 h	9000 h
Lunghezza l	150 mm	204 mm
Diametro esterno d	30 mm	46 mm
Altezza del centro luminoso a	102 mm	132 mm

figura 4.45

4.3.4 Lampade a luce miscelata

Le lampade a luce miscelata (figura 4.46) sono un prodotto ibrido basato sulla tecnologia delle lampade a vapori di mercurio, a cui viene aggiunto un filamento ad incandescenza in serie al tubo di scarica. Le lampade così realizzate presentano una luce detta appunto miscelata con una componente a spettro continuo tipica del filamento ad incandescenza. Il vantaggio delle lampade miscelate sta nella loro facilità d'uso, dovuta al fatto che non è necessario alcun tipo di ausiliario elettrico (sostituito dal filamento interno alla lampada), per cui risulta possibile connettere la lampada su un comune attacco Edison.

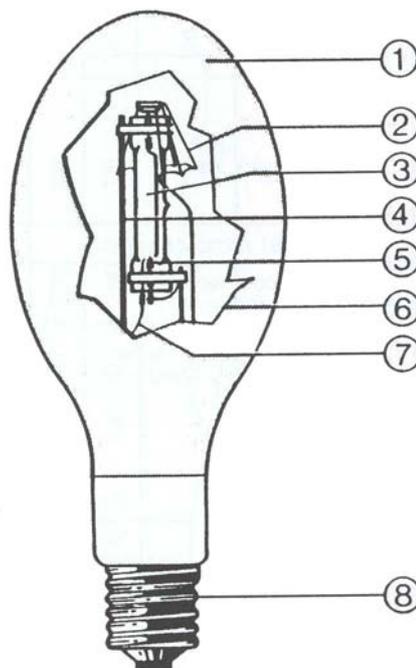


figura 4.46

L'efficienza e la durata di vita delle lampade a luce miscelata (figura 4.47) sono fortemente condizionate dalla presenza del filamento che inoltre le rende abbastanza sensibili alle variazioni della tensione, per cui ne risulta conveniente l'applicazione in quei contesti dove la facilità d'uso è più importante degli aspetti economici.

Tipo di sorgente	Dimensioni mm	Attacco	Tensione di alimentazione (V)	Potenza nominale (W)	Potenza assorbita (VA)	Flusso luminoso (lm)	Efficienza luminosa (lm/W)	Durata media (ore)	Temperatura di colore (K)	Indice di resa del colore (R_a)
Lampada a luce miscelata – standard	177 × 55	E 27	230	160	160	3100	19	7500	5000	40
– de luxe	226 × 90	E 40	230	250	250	5600	22	7500	3300	75
– de luxe	315 × 160	E 40	230	1000	1000	32.000	32	7500	3300	75

figura 4.47

Sono lampade in grado di emettere una forte quantità di luce con temperatura di colore più elevata rispetto alle lampade a filamento. La resa cromatica è simile a quella delle lampade a vapori di mercurio, ma loro efficienza è inferiore.

4.3.5 Lampade a vapori di sodio a bassa pressione

La lampada al sodio a bassa pressione è stata la prima lampada a scarica in gas, introdotta nel 1932, ed ancora oggi rimane la migliore sorgente in fatto di efficienza luminosa. Il principio di funzionamento è simile a quello delle lampade a vapori mercurio. L'innesco è facilitato da piccole quantità di neon e argon. Il valore ottimale della pressione del vapore di sodio è circa 0.4 Pa. Per ottenere questa pressione all'interno del tubo di scarica, la parete non deve scendere sotto la temperatura di 260°C (in corrispondenza della quale l'efficienza della lampada è massima), condizioni queste che creano dei problemi tecnologici supplementari, particolarmente a causa dell'aumento delle perdite di calore verso l'esterno e ciò, a parità di potenza della lampada, riduce l'efficienza. Nella figura 4.48 possiamo vedere le singole parti di una lampada a vapori di sodio a bassa pressione, che sono:

- 1) Attacco a baionetta;

- 2) Getter;
- 3) Supporti;
- 4) Elettrodi;
- 5) Vaschette di raccolta del sodio;
- 6) Tubo di scarica;
- 7) Tubo esterno;
- 8) Punto per la messa a vuoto.

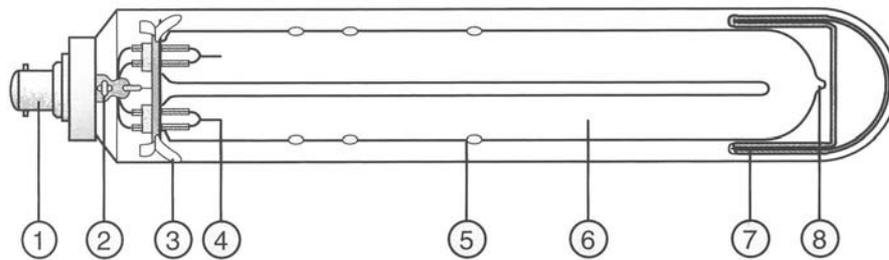


figura 4.48

La trasmissione del calore si riduce sagomando il tubo di scarica a forma di U e richiudendolo in un'ampolla di vetro, rivestita internamente da ossido di indio. Tale ossido risulta trasparente alle radiazioni luminose e riflette quelle infrarosse. Fra il tubo di scarica e quello di rivestimento si pratica il vuoto. Il tubo di scarica deve essere anche resistente all'attacco del vapore di sodio e quindi il vetro comune non è adatto e si usa rivestirlo con uno strato di circa $50\mu\text{m}$ di vetro borato. Il flusso luminoso utile è emesso dalla colonna positiva; l'efficienza luminosa è molto elevata, e per le lampade di produzione in serie il valore si aggira sui 180 lm/W con una vita media di oltre 9000 ore. L'emissione luminosa di regime si ottiene dopo circa 10 minuti dall'accensione. Per questo tipo di lampada non ha senso parlare di resa cromatica, in quanto la percezione dei colori è praticamente nulla. Infatti la qualità della luce prodotta è scarsa, di tipo monocromatica nel campo spettrale del giallo (si ha un'unica banda di emissione vicina ai 600 nm , punto di massima sensibilità dell'occhio umano) che rende la lampada poco adatta per l'illuminazione di interni (visto che non consente la distinzione dei colori). Sono invece utilizzate per impianti stradali, industriali e di sicurezza. Anche queste lampade necessitano di apparecchiatura

ausiliaria. Il sistema di alimentazione gioca anch'esso un ruolo nell'aumento dell'efficienza del sistema, in quanto in generale tutte le lampade a vapori di sodio a bassa pressione possono essere alimentate con diversi tipi di apparecchiature. L'alimentatore più diffuso in passato era il sistema ad autotrasformatore, cioè un componente unico in grado di fornire anche l'impulso di tensione necessario all'innesco. Questo sistema è stato soppiantato dai più moderni sistemi ibridi, e cioè composti da alimentatore elettromeccanico ed accenditore elettronico, che consentono di diminuire le perdite del 20% rispetto ai sistemi ad autotrasformatore. Rendimenti ancora migliori si possono conseguire con sistemi ibridi a potenza costante. Nella tabella di figura 4.49 possiamo vedere alcuni dati caratteristici di lampade a vapori di sodio a bassa pressione:

Tipo di sorgente	Dimensioni mm	Attacco	Tensione di alimentazione (V)	Potenza nominale (W)	Potenza assorbita (VA)	Flusso luminoso (lm)	Efficienza luminosa (lm/W)	Durata media (ore)	Temperatura di colore (K)	Indice di resa del colore (R_a)
Lampada a vapori di sodio a bassa pressione	216 × 53	BY 22	230	18	25	1800	100	10.000	–	–
»	310 × 52	BY 22	230	35	56	4800	137	10.000	–	–
»	452 × 52	BY 22	230	55	76	8000	145	10.000	–	–
»	528 × 66	BY 22	230	90	113	13.500	150	10.000	–	–
»	775 × 66	BY 22	230	135	175	22.500	166	10.000	–	–
»	1120 × 66	BY 22	230	180	220	33.000	183	10.000	–	–

figura 4.49

4.3.6 Lampade a vapori di sodio ad alta pressione

Come per le lampade al sodio a bassa pressione, il comportamento è simile a quello delle lampade ai vapori di mercurio. Le lampade al sodio ad alta pressione rappresentano oggi lo standard per l'illuminazione stradale ed industriale, grazie principalmente all'elevata efficienza luminosa. La vastità delle applicazioni di queste lampade si riflette nel numero delle tipologie disponibili e sulla gamma delle potenze che varia da 50W a 1000W. Quasi tutte le lampade sono disponibili sia in versione polverata ovoidale, che in versione

chiara tubolare per ottiche più moderne. Le lampade al sodio ad alta pressione si possono dividere in alcune grandi categorie:

- Lampade al sodio di tipo *standard* : con pressione del sodio di 10KPa, sono caratterizzate dall'efficienza massima (da 65 a 125 lm/W a seconda della potenza), temperatura di colore pari a 2000K e una resa del colore scarsa (Ra=20). E' prodotta in una vasta gamma di potenze e secondo 3 esecuzioni:
 - a) Tubolare con attacco Edison: è l'esecuzione più diffusa, per la compattezza della fonte di luce e la semplicità del montaggio;
 - b) Con ampolla diffondente e attacco Edison: è un'esecuzione destinata soprattutto a utilizzare le ottiche degli apparecchi di illuminazione costruiti per le lampade a vapori di mercurio;
 - c) Tubolare con doppio attacco: è la lampada usata soprattutto nei proiettori perché si presta a un posizionamento preciso dentro il riflettore.
- Lampade al sodio *a resa del colore migliorata* : con pressione del vapore di sodio di 40KPa, un'efficienza pari a circa 2/3 di quelle di tipo "standard", una temperatura di colore pari a 2150K e una resa di colore Ra=60, queste lampade vengono prodotte in una gamma limitata di potenze e secondo le due stesse esecuzioni a) e b) di prima. Quindi l'aumento della pressione interna porta da un lato il miglioramento delle caratteristiche cromatiche, ma dall'altro una diminuzione dell'efficienza.
- Lampade *ad alto contenuto di xeno* : queste lampade sono state ottenute modificando la composizione del tubo di scarica, aggiungendo dello xeno ad alta pressione. Questa modifica non offre alcun vantaggio in termini di colore, ma consente di aumentare l'efficienza di circa il 15% rispetto alle lampade comuni. Un'altra caratteristica di questa tecnologia, è la bassa sensibilità alle variazioni della tensione di rete, il che porta ad un aumento della durata di vita che può arrivare al 20%.

Le lampade a vapori di sodio ad alta pressione (figura 4.50) sono ritenute generalmente adatte solo per impieghi in cui è fondamentale avere un'elevata economicità di servizio e meno rilevanti sono gli aspetti di resa dei colori o la possibilità di distinguere le differenze di colore.

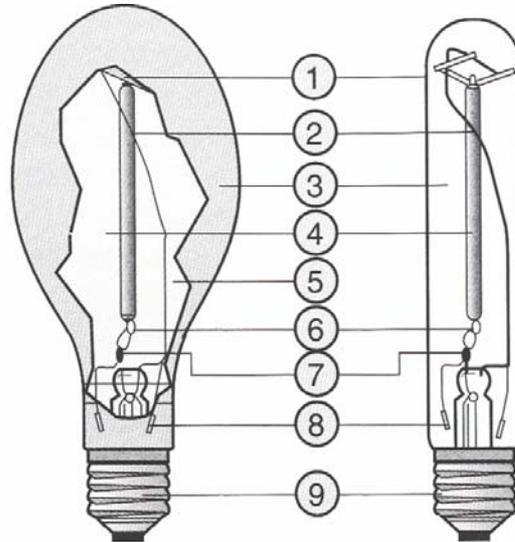


figura 4.50

dove :

- 1) Supporto;
- 2) Collegamento elettrico;
- 3) Bulbo esterno;
- 4) Tubo di scarica;
- 5) Rivestimento diffondente;
- 6) Terminale tubo di scarica;
- 7) Collegamento elettrico;
- 8) Getter;
- 9) Attacco.

Con la nuova lampada al sodio-xeno e il relativo alimentatore elettronico è stato creato un nuovo sistema ad elevata economicità d'esercizio per l'illuminazione in generale e l'illuminazione d'accento.

Caratteristiche principali di questo sistema sono:

- luce bianca;
- con una sola lampada la possibilità di commutare tra due temperature di colore da 2600 K a 3000 K agendo sull'alimentatore elettronico;

- ottima resa dei colori sia nel campo del rosso sia in quello del blu;
- elevata stabilità del punto di colore e costanza della temperatura di colore così come dell'indice di resa dei colori indipendentemente da eventuali differenze costruttive da lampada a lampada, dall'età della lampada e dalla tensione di rete, grazie alla regolazione effettuata da un microprocessore contenuto nell'alimentatore;
- elevata efficienza luminosa e lunga durata di lampada;
- emissione di UV trascurabile;
- posizione di funzionamento qualsiasi;
- tempo di accensione 70 secondi;
- totale assenza di mercurio (la lampada non rientra nella categoria dei rifiuti speciali);
- alimentazione con apposita unità elettronica.

L'impiego principale di queste lampade riguarda l'illuminazione di interni e di esterni di elevata qualità, in particolare l'illuminazione di aree commerciali.

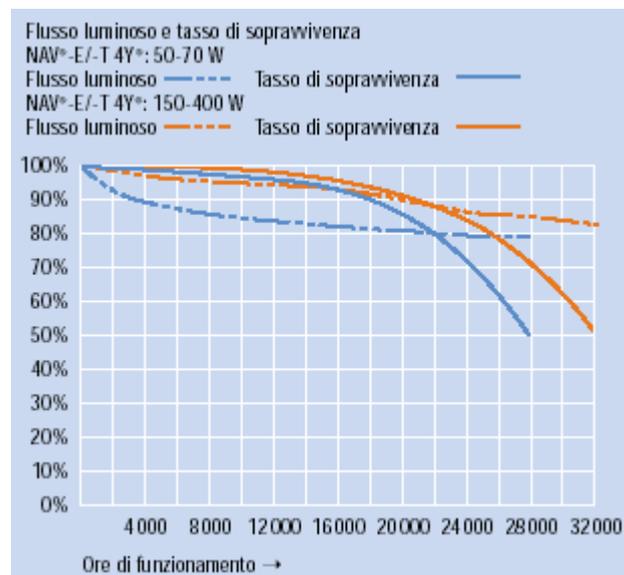
La generazione della luce avviene all'interno del tubo di scarica. Il tubo, realizzato in ceramica, si trova all'interno del bulbo esterno di forma tubolare.

Gli elettrodi sono costruiti in tungsteno additivato, resistente alle elevate temperature, sotto forma di una spirale a doppio strato. La distanza tra gli elettrodi e quindi la lunghezza dell'arco di scarica è di 37 mm. Come gas di base il tubo di scarica viene riempito con gas xeno. Dopo la prima scarica ad alta tensione all'atto dell'innesco, si forma un arco di scarica bluastro dovuto al gas xeno che provoca un rapido riscaldamento del tubo di scarica. Il sodio incomincia ad evaporare (luce gialla) e l'emissione di luce è in seguito prodotta esclusivamente dal sodio. Dopo che si è instaurata una scarica stabile, la tensione di lampada (tensione di funzionamento) è determinata principalmente dalla pressione del vapore di sodio. Questa pressione dipende dal punto più freddo (cold spot) all'interno del tubo di scarica.

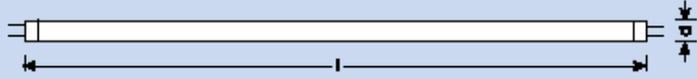
Tipo di sorgente	Dimensioni mm	Attacco	Tensione di alimentazione (V)	Potenza nominale (W)	Potenza assorbita (VA)	Flusso luminoso (lm)	Efficienza luminosa (lm/W)	Durata media (ore)	Temperatura di colore (K)	Indice di resa del colore (R_a)
Lampada a vapori di sodio ad alta pressione	156 × 70	E 27	230	50	62	3500	70	12.000	2000	–
»	156 × 70	E 27	230	70	83	5900	84	12.000	2000	–
»	226 × 90	E 40	230	150	170	15.500	103	12.000	2000	–
»	290 × 120	E 40	230	400	450	47.000	118	12.000	2000	–
»	400 × 165	E 40	230	1000	1090	12.000	120	12.000	2000	–
Lampada a vapori di sodio ad alta pressione (alta resa cromatica)	145 × 31	PG-12	220÷240	33	42	1300	39	5000	2500	80
»	145 × 31	PG-12	220÷240	53	64	2300	43	5000	2500	80

figura 4.51

Nella figura 4.52 possiamo vedere le caratteristiche dichiarate dal costruttore (Osram) al riguardo dei prodotti della linea di lampade al sodio ad alta pressione VIALOX NAV SUPER 4Y, garantite per una durata di 16000 ore, corrispondenti a circa 4 anni di impiego nelle tipiche applicazioni di illuminazione stradale.



Dati tecnici

		Dimensioni in mm			
					
Lampada		F 4Y* 36 W	F 4Y* 36 W	F 4Y* 58 W	F 4Y* 58 W
Tipo		F 4Y 36 W/840	F 4Y 36 W/830	F 4Y 58 W/840	F 4Y 58 W/830
Codice	EAN	4050300 623542	4050300 623528	4050300 623580	4050300 623566
Flusso luminoso con CCG	lm	3200	3200	5000	5000
Temperatura di colore	K	4000	3000	4000	3000
Tonalità di luce/ resa cromatica	R _a	LUMILUX Tonalità calda/80-89	LUMILUX Tonalità bianchissima/80-89	LUMILUX Tonalità calda/80-89	LUMILUX Tonalità bianchissima/80-89
Durata media nominale*	h	24000	24000	24000	24000
Difettosità dopo 16.000 ore	%	5	5	5	5
Diametro d	mm	26	26	26	26
Lunghezza l	mm	1200	1200	1500	1500
Attacco		G13	G13	G13	G13
Unità d'imballo	pezzi	25	25	25	25

CCG = alimentatore convenzionale

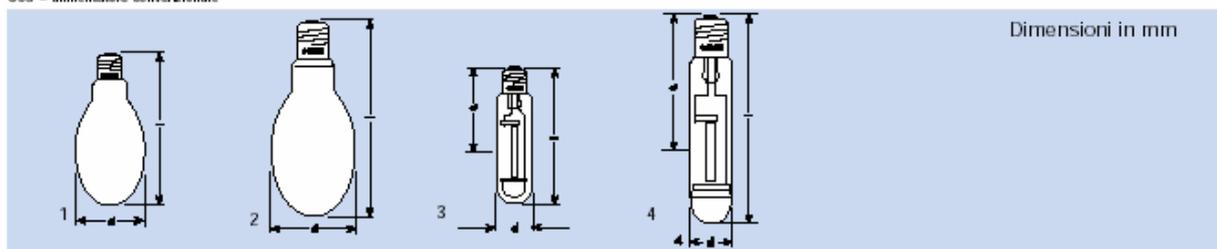


figura 4.52



4.3.7 Lampade ad arco

Sono ancora essenzialmente costituite da due elettrodi di forma cilindrica allungata con gli estremi tenuti a piccola distanza l'uno dall'altro.

Tra questi, quando agli altri due estremi è applicata una conveniente differenza di potenziale, si stabilisce un arco. Ne consegue una forte elevazione della temperatura degli estremi degli elettrodi stessi, i quali perdono materiale per sublimazione consumandosi piuttosto rapidamente e assumendo le caratteristiche forme appuntite per l'elettrodo negativo, a cratere per quello positivo. Il materiale che si libera dagli elettrodi resta per un certo tempo all'interno della scarica, costituendo quella che correntemente si chiama la *fiamma* dell'arco, sotto forma di particelle solide o di vapori dei componenti degli elettrodi. La luce prodotta è dovuta al contemporaneo verificarsi di fenomeni di emissione per temperatura da parte delle estremità degli elettrodi e delle particelle di carbone che permangono nell'arco, nonché a fenomeni di emissione provocati dalla scarica vera e propria nel seno dei vapori.

Tra i tipi ancora impiegati si ricorda la lampada a carbone Beck con la quale si riesce a ottenere condizioni di funzionamento soddisfacenti, addirittura competitive con quelle delle lampade a incandescenza. In essa l'elettrodo positivo è costituito da un tubetto di carbone omogeneo riempito di materiale attivo (fluoruro o carburo di cerio), quello negativo di carbone omogeneo: si ottiene una fiamma molto brillante e assai bianca.

Tipi di impiego	Differenza di potenziale V	Corrente A	Diametro degli elettrodi		Velocità di combustione dell'elettrodo positivo mm/1'	Densità di corrente dell'elettrodo positivo A/mm ²
			positivo mm	negativo mm		
Proiettori cinematografici	45-55	75-100	11	9	2-4	0,8-1,05
	50-60	100-120	12	10	2-4	0,89-1,06
	60-70	120-130	13,6	11	2-4	0,83-1,03
Proiettori militari	66	90	11	11	5	0,95
	67	130	14	11	5	0,85
	77	150	16	13	4	0,75
	85	200	19	15	3	0,70

figura 4.50

Per contenere il rapido consumo degli elettrodi, da cui deriva un rilevante onere di esercizio per questo tipo di lampade, si è tentato di realizzare gli archi di tipo ora descritto, anziché come si dice a fiamma libera, in un ambiente chiuso costituito da un doppio involucro di vetro realizzato in modo che i prodotti della combustione liberati dall'arco si scarichino all'aperto passando per l'intercapedine formata dai due involucri. Si ottiene così una forte diminuzione del consumo degli elettrodi la cui durata arrivava a decuplicarsi; ma a questi vantaggi corrisponde una sensibile riduzione dell'efficienza dovuta anche all'annerimento dell'involucro esterno su cui si depositano i prodotti della combustione. Per ridurre il consumo degli elettrodi si è proposto anche l'impiego di metalli diversi per la costruzione degli elettrodi stessi. Tra le lampade che utilizzano questo artificio si ricorda quella detta *ad arco a megnetite*, un tempo largamente utilizzata per l'illuminazione pubblica, specialmente negli Stati Uniti. Essa ha l'elettrodo negativo in rame generalmente forgiato a tubo e quello positivo costituito da un miscuglio di ossidi metallici in polvere pressato in un tubo di ferro a parete sottile. Ci sono poi le *lampade ad arco breve*: sotto questa generica denominazione si vuole raccogliere un gruppo di sorgenti, alcune di sviluppo recente, che mentre per gli aspetti costruttivi ricordano le lampade a incandescenza, hanno proprietà fisiche non dissimili da quelle dell'arco. Le caratteristiche di funzionamento che esse hanno in comune, rappresentate da una luminanza molto elevata e da dimensioni assai ridotte dall'elemento luminoso, le rendono particolarmente adatte a usi fotografici, all'impiego in apparecchi di proiezione, ecc. Possono essere alimentate indifferentemente in corrente alternata o continua. In figura 4.51 vediamo una lampada ad arco a elettrodi di tungsteno.

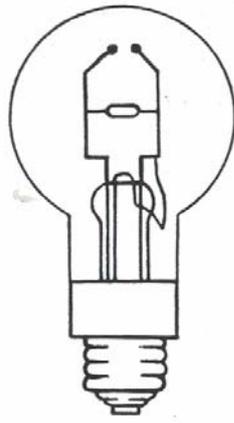


figura 4.51

Tra le lampade più recenti e di più largo interesse si ricordano infine le lampade ad arco corto in atmosfera di vapore di mercurio o di xeno con le quali si ottengono i più elevati valori di luminanza fin qui raggiunti (225000 cd/cm^2). Sono costituite da ampole di silice pura particolarmente resistente in cui sono alloggiati massicci elettrodi di tungsteno posti a distanza di $3\div 4 \text{ mm}$ (vedi figura 4.52).

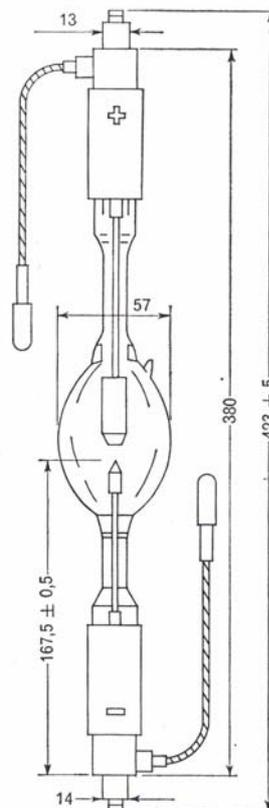


figura 4.52

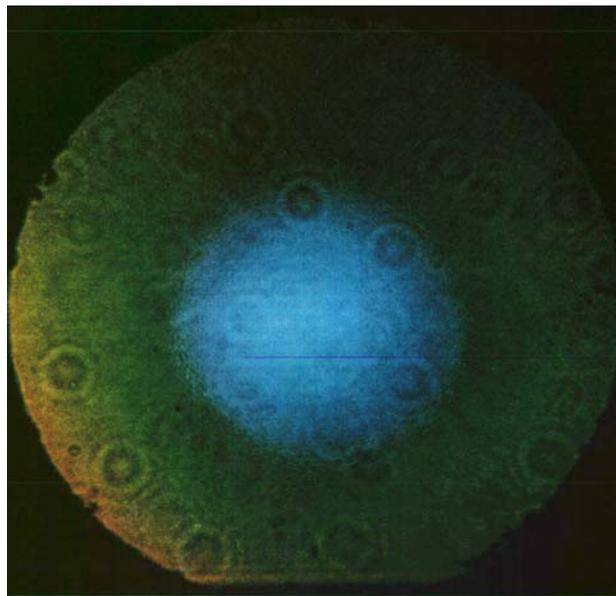
Le lampade allo xeno hanno un avviamento immediato e l'arco si può reinnescare anche a lampada calda, permettendo accensioni intermittenti. La luce è bianca a spettro continuo. Per l'innesco è necessario un impulso di tensione dell'ordine di 50000V, prodotto da apparecchiature ausiliarie.

4.4 Lampade ad induzione

Le lampade ad induzione elettromagnetica rappresentano un'innovazione fondamentale per il concetto stesso di sistema di illuminazione. E' un tipo di lampada di recente introduzione, sono infatti disponibili sul mercato dal 1990. Sono sorgenti a forma di bulbo costituite da un'ampolla di vetro, rivestita internamente con polveri fluorescenti e riempita con vapori di mercurio, contenente un avvolgimento. L'avvolgimento svolge il ruolo di un'antenna, infatti alimentato da un oscillatore ad alta frequenza (2.65 MHz) esterno alla sorgente, crea un campo magnetico che dà luogo a correnti indotte all'interno dell'ampolla. La circolazione di questa corrente è permessa da ioni del vapore di mercurio che riempie l'ampolla. Ciò genera l'emissione di luce ultravioletta che colpisce lo strato di polveri fluorescenti provocando l'emissione di luce visibile. Queste lampade presentano interessanti aspetti di praticità ed affidabilità: essendo prive di componenti deperibili (non ci sono gli elettrodi), la durata di vita è di 60000 ore, che corrispondono a circa 15 anni di funzionamento di un impianto di illuminazione per circa 11 ore al giorno. Sono perciò indicate quando la sostituzione delle lampade sia difficile e costosa. Inoltre, queste lampade generano luce istantanea anche dopo un'interruzione di funzionamento (tempo di innesco 0.1 s). A queste caratteristiche si deve aggiungere una resa dei colori Ra pari a 80, la possibilità di scegliere fra le diverse tonalità di colore ed un'efficienza complessiva di sistema pari alle lampade al sodio ad alta pressione. Le potenze attualmente disponibili sono 55W e 85W mentre le efficienze variano da 65 lm/W a 70 lm/W, le temperature di colore 3000 K e 4000 K.

4.5 Led e laser

La parola LASER è l'acronimo di "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", ovvero "amplificazione della luce tramite emissione stimolata delle radiazioni". I laser a elettroni liberi e quelli a raggi x sono i due tipi di sorgente più innovative e interessanti tra quelle apparse negli ultimi anni. Il materiale attivo è costituito da un fascio di elettroni liberi di muoversi in un campo magnetico spazialmente periodico. In teoria il laser ad elettroni liberi è una sorgente di luce estremamente versatile. Ha un elevato rendimento, può essere accordato virtualmente su qualsiasi lunghezza d'onda, funziona ad alta potenza. I laser a gas e a stato solido possono invece generare soltanto luce di particolari lunghezze d'onda corrispondenti a transizioni energetiche nel loro materiale. Inoltre, mentre i laser convenzionali normalmente trasformano in luce solo una piccola frazione dell'energia in ingresso, i laser ad elettroni liberi hanno potenzialmente un rendimento fino al 65%. I laser ad elettroni liberi sono stati impiegati sperimentalmente in diversi settori della ricerca, dalla fisica alla biologia molecolare. Nella pratica l'impiego di questi tipi di laser è tuttavia rimasto in gran parte limitato al laboratorio.



Attualmente esistono laser a emissione continua ad altissima potenza (per esempio, laser ad anidride carbonica) che emettono alcuni kW nell'infrarosso su superfici ridottissime. Questi sono impiegati nell'industria per tagliare, forare e saldare con altissima precisione. Tra quelli a bassa potenza troviamo i laser a diodo semiconduttore (arseniuro di gallio), piccoli quanto uno spillo, utilizzati come indicatori luminosi dai conferenzieri.

LED è l'acronimo di "Light Emitting Diode" e nel suo principio di funzionamento sfrutta il fatto che in alcuni semiconduttori, quali, per esempio l'arseniuro di gallio, si ha un numero elevato di ricombinazioni dirette (la ricombinazione è il processo per cui un elettrone, spostandosi dalla banda di conduzione alla banda di valenza, provoca la scomparsa di una coppia lacuna-elettrone): quando un elettrone cade dalla banda di conduzione nella banda di valenza, libera energia che appare sotto forma di radiazione. In molte aree applicative i moderni LED sono diventati serie alternative alle lampade convenzionali. I supercompatti semiconduttori possono infatti sostituire le lampade in molte applicazioni esistenti. La sintesi delle competenze della tecnologia dei semiconduttori e delle capacità di ingegnerizzazione nel campo dell'illuminazione è destinata a sviluppare nuove soluzioni e a far progredire ancora più rapidamente la tecnologia dei diodi ad emissione di luce. Sono molte e forti le regioni che portano all'utilizzo crescente dei LED in ogni tipo di illuminazione e display. Rispetto alle sorgenti luminose convenzionali questi dispositivi luminosi offrono molti vantaggi:

- Dimensioni drasticamente ridotte che aprono nuovi orizzonti al design;
- Estrema robustezza;
- Bassa dissipazione di calore;
- Regolabilità in modo continuo;
- Durata estremamente lunga, da 50.000 a oltre 100.000 ore;
- Risparmio di energia.

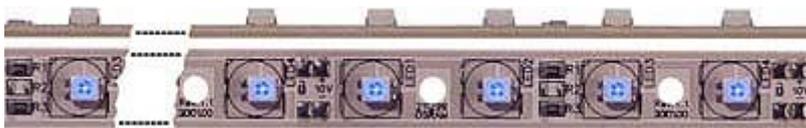
I LED sono disponibili non solo nei tradizionali colori rosso, giallo e verde utilizzati nella segnaletica, ma anche a luce blu, da pochissimo tempo, anche a luce bianca. In questo caso viene utilizzato un LED a luce blu dotato di un fosforo particolare che produce luce bianca. I LED possono essere realizzati su misura in un'ampia gamma di forme. Vediamo alcuni prodotti sul mercato dal catalogo della Osram:

I moduli LED di OSRAM Opto Semiconductors sono composti da LED integrati con dispositivi passivi o attivi di regolazione della corrente. I singoli LED sono montati su circuiti stampati rigidi o flessibili. In funzione del campo di applicazione è anche possibile aggiungere elementi ottici secondari quali lenti, riflettori e guide di luce piane.



Tra i prodotti della linea moduli LED di Osram segnaliamo la serie LINEARlight. Questi hanno la possibilità di ottenere lunghezze variabili grazie

alla possibilità di separazione in unità più piccole.



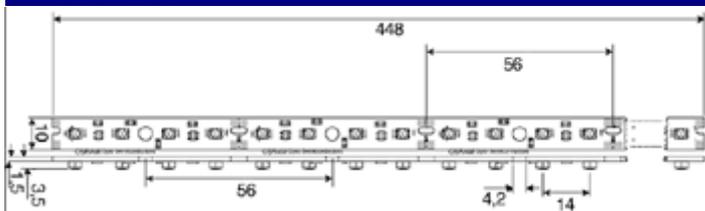
Utilizzabile in molteplici applicazioni

- Trasporto di luce attraverso materiali trasparenti e diffondenti
- Segnaletica di emergenza e display pubblicitari
- Demarcazione di percorsi e contorni

Caratteristiche e vantaggi

- Elevata potenza luminosa grazie a OSRAM Power TOPLED®
- Ridotta generazione di calore
- Altezza ridotta (< 5 mm) per apparecchi di illuminazione da incasso ed estremamente piatti
- Separabile in unità da 4 LED senza perdita di funzionalità del modulo restante
- Disponibile in tutti i colori dei LED
- Funzionamento ottimale con alimentatore elettronico OPTOTRONIC OT12/230-240/10 oppure OT06/100-240/10
- Semplicità di collegamento grazie al sistema di connettori per moduli LED (BJB)

OS-LM01A-x



Tipo/caratteristiche tecniche	OS-LM01A-A	OS-LM01A-Y	OS-LM01A-T1	OS-LM01A-B1	OS-LM01A-W1
Colore	amber(rosso)	yellow(giallo)	true green(verde)	blue(blù)	white(bianco)
Intensità luminosa/LED; I _V (mcd) tip.	535	280	375	95	280
Lunghezza d'onda	617 nm	587 nm	525 nm	470 nm	x=0,32/y=0,31
Dati elettrici: V _B	10 V _{DC}	10 V _{DC}	10 V _{DC}	10 V _{DC}	10 V _{DC}
Dati elettrici: I _B ; P _V	0,4A; 4W	0,32A; 3,2W	0,4A; 4W	0,4A; 4W	0,32A; 3,2W
Altri dati (validi per tutti i moduli)	Numero di LED per modulo: 32 Dimensioni esterne del modulo completo: 448mm * 10mm; Unità più piccola con 4 LED: ca. 56mm * 10mm Angolo di emissione (FWHM):120° Campo della temperatura di esercizio: - 30 ... +65 °C				

Recente notizia è quella che i ricercatori di Philips e dell'università di Amsterdam in Olanda hanno creato il primo materiale per LED e displays a pannello piatto che possono accendersi in due colori differenti. Gli altri materiali elettroluminescenti emettono luce di un colore stabilito quando l'elettricità li attraversa. Il risultato è stato finora che apparecchi multicolori, come televisori a schermo piatto e monitor di computer, hanno richiesto tre differenti materiali, uno per il rosso, un altro per il verde ed un altro ancora per il blu. Il nuovo materiale è costituito da una miscela di un polimero semiconduttore e di un composto contenente rutenio. L'applicazione di una corrente elettrica in una certa direzione eccita il metallo, provocandone l'emissione di luce rossa; una corrente in direzione opposta eccita il polimero che si accende di verde. Il materiale bicolore consentirà ai progettisti di realizzare displays a colori impiegando due invece che tre materiali.

Conclusioni

Alla fine di questa trattazione sulle sorgenti luminose attualmente sul mercato, chiuderemo con un riepilogo delle principali caratteristiche che differenziano le une dalle altre; differenze che ci faranno scegliere un tipo di lampada o un altro a seconda del tipo di uso che ne vogliamo fare. Nella scelta vengono usati criteri di qualità della luce emessa, ma anche di costo e di praticità. Per esempio, per quanto riguarda la durata delle lampade e la loro sostituzione, se l'applicazione comprende apparecchi di illuminazione collocati in soffitti molto alti o in altri posti difficili da raggiungere, il costo del lavoro di manutenzione richiesto dalla sostituzione delle lampade può essere di gran lunga superiore al costo di una nuova lampada. In questa situazione, i costi di manodopera e ricambio possono rendere più economica la sostituzione di molte lampade contemporaneamente, prima che raggiungano il limite della loro durata utile, piuttosto che singolarmente man mano che vanno fuori servizio. Un altro esempio: quanto

dovrebbe costare l'illuminazione? I prodotti di illuminazione che offrono proprietà cromatiche superiori, maggiore efficienza e maggiore durata tendono ad essere più costosi. Nella maggior parte dei casi, comunque, il costo aggiuntivo è una porzione molto piccola dei costi di installazione complessivi. Inoltre, i risparmi di energia generati dai sistemi di illuminazione moderni ad alta efficienza ripagano molto in fretta l'investimento assicurando un significativo guadagno. Vediamo in figura 4.54 un riepilogo delle caratteristiche salienti delle più comuni sorgenti luminose.

Confronto dei principali tipi di lampada

Incandescente	Vantaggi	Svantaggi
	Basso costo di acquisto Piccole dimensioni Eccellente Ra Varietà di forme Regolabile	Bassa efficienza Elevato sviluppo di calore Alti costi di esercizio Breve durata
Alogene	Piccole dimensioni Maggiore efficienza Maggiore durata Eccellente indice Ra Luce bianca brillante Regolabile	Elevato sviluppo di calore
Fluorescenti	Elevata efficienza Lunga durata Scelta di temperatura di colore Bassi costi di esercizio Basso sviluppo di calore Sorgenti luminose diffuse	Elevato costo iniziale Sensibile alla temperatura Controllo ottico limitato Richiede alimentatore
Alogenuri metallici	Elevata efficienza Lunga durata Buon controllo ottico Bassi costi di esercizio Buona resa cromatica	Elevato costo iniziale Necessità di alimentatore Lungo periodo di accensione/riaccensione
Sodio ad alta pressione	Lunga durata Efficienza eccezionale Buon controllo ottico Costi di esercizio molto bassi Basso decadimento del flusso luminoso	Costo iniziale elevato Necessità alimentatore Tempi lunghi di accensione/riaccensione Scarsa resa cromatica

figura 4.54

Bibliografia

- Manuale Cremonese di elettrotecnica
Edizioni Cremonese, 1992
- Fondamenti di fotometria e tecnica di illuminazione
M.Serra – V.Calderano, Edizioni Esa
- Lezioni di illuminotecnica
Pietro Palladino
- Manuale dell'ingegnere Nuovo Colombo
Editore Ulrico Hoepli, Milano 1997
- Le scienze quaderni, Il colore
Periodico "Le scienze" a cura di Andrea Frova, 1994
- Le scienze quaderni, Laser e fotonica
Periodico "Le scienze" a cura di Orazio Svelto, 1991
- Manuale di illuminotecnica
AIDI – Associazione Italiana Di Illuminazione, ED.Tecniche Nove, 1999
- Tecnica dell'illuminazione
Gino Parolini - Marcello Paribeni, ED. Utet, 1977
- Catalogo on-line della ISIS s.r.l.
- Catalogo on-line della Osram s.p.a.
- Technology review edizione italiana 5/2003

