

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”



Laurea triennale in Ottica e Optometria

**Indagine sui possibili cambiamenti
dell’accomodazione al variare della
temperatura colore**

Relatori:

Prof. Salvatore Abys

Candidato:

Paola Guarracino

M44000133

A.A. 2019/2020

A mia nonna,
esempio di donna forte e coraggiosa,
ma anche fragile e dolce,
ai suoi occhi sempre gioiosi e sorridenti,
alla sua voglia di vivere,
al suo modo di amare la vita.

INDICE

INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 1- L'ANATOMIA DELL'OCCHIO	7
1.2 L'OCCHIO COME DIOTTRO OCULARE	7
2.1 IL CRISTALLINO	8
2.1.2 CHIMICA DEL CRISTALLINO NORMALE	9
2.2 LA ZONULA DI ZINN	10
2.3 IL CORPO CILIARE	10
CAPITOLO 3- L'ACCOMODAZIONE	11
3.1 CENNI STORICI	11
3.2 FISILOGIA DELL'ACCOMODAZIONE	12
3.3 SEQUENZA BIOMECCANICA DELL'ACCOMODAZIONE	12
3.4 ACCOMODAZIONE RIFLESSA	13
3.5 ACCOMODAZIONE VOLONTARIA	13
3.6 ACCOMODAZIONE TONICA	13
3.7 ACCOMODAZIONE DINAMICA E ACCOMODAZIONE STATICA	14
3.8 PUNTO PROSSIMO, PUNTO REMOTO, AMPIEZZA ACCOMODATIVA	14
3.9 MISURA DELL'AMPIEZZA ACCOMODATIVA	15
3.10 MISURA DELLA FACILITA' ACCOMODATIVA	16
3.11 ANOMALIE DELL'ACCOMODAZIONE	16
3.11.1 FATTORI FUNZIONALI DI INFLUENZA	16
3.11.2 FATTORI PATOLOGICI DI INFLUENZA	18
CAPITOLO 4- LA LUCE E L'OCCHIO	18
4.1 LA LUCE	18
4.2 EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI	19
4.3 ILLUMINAZIONE NATURALE E ARTIFICIALE	20
4.4 LAMPADINE A LED	21
4.4.1 I 10 VANTAGGI DELLA LUCE LED	23
4.5 TEMPERATURA COLORE	23
4.6 LAMPADINE LED: LUCE CALDA E LUCE FREDDA	29
4.7 LA LUCE BLU	30
4.8 CRITERI PER UNA BUONA ILLUMINAZIONE	32

CAPITOLO 5- ESECUZIONE DEL TEST	33
5.1 LO SCOPO	33
5.2 I MEZZI	33
5.3 ESECUZIONE	33
5.4 NOTE	34
5.5 LAMPADINE UTILIZZATE	34
5.6 DATI SPERIMENTALI	37
CONCLUSIONI	43
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	44
RINGRAZIAMENTI	45

INTRODUZIONE

Uno degli scopi principali dell'Optometrista è di indagare a fondo sulla funzione visiva.

I vizi di refrazione differiscono tra loro e ogni soggetto deve essere esaminato con professionalità al fine di poter definire una giusta correzione .

Per ottenere un risultato ottimale l'optometrista effettua un'indagine preliminare sullo stato refrattivo del soggetto, sull'eventuale tipo di correzione già in uso (a tempiale o lenti a contatto), sul suo stato di salute generale, malattie attuali o pregresse, sulla presenza di indicazioni che possono essere utilizzate per valutare un'ametropia, come bruciore agli occhi, astenopia, stanchezza oculare.

Dopo l'anamnesi preliminare devono essere svolti molteplici test per poter identificare, compensare ed accertare di aver corretto adeguatamente la visione, sia distale che prossimale. È bene notare che la visione distale e quella prossimale non sempre combaciano: a causa della differenza con il mondo visivo reale diverse tecniche possono dare differenti risultati, se confrontate l'un l'altra e con l'effettiva condizione visiva.

Le influenze durante un test sono numerose, poche controllabili e molte sconosciute, per questo sono preferibili tecniche che riducano al minimo l'influenza sulla funzione esaminata. Le tecniche considerate più attendibili si svolgono in condizioni ambientali, in quanto la percezione è quasi identica al normale (per ampiezza di campo, sensazione di prossimità).

La visione può, quindi, essere suddivisa in alcuni aspetti e sensibilità:

- alla luce (presenza o assenza di questa)
- a stimoli che variano nello spazio (differenze di luce alla base di un'immagine)
- a stimoli che variano nel tempo (un oggetto che si muove nel tempo o una luce ad intermittenza)
- a stimoli caratterizzati da diversa distribuzione energetica (ossia diversi colori)
- a stimoli posti in varie posizioni del campo visivo monoculare o anche binoculare.

In questo lavoro di tesi ci occuperemo di valutare un'eventuale variazione del comportamento accomodativo, utilizzando sorgenti luminose di diversa temperatura-colore (gradi Kelvin). È da notare come curiosamente, al diminuire della temperatura-colore, l'illuminazione assuma un aspetto rossastro, comunemente definito "caldo"; mentre al suo aumentare, l'aspetto diviene bluastro, definito "freddo".

Nella letteratura ottica oftalmica di tipo tradizionale , si è sempre sostenuto che la quantità di accomodazione utilizzata da un soggetto fosse facilmente misurabile conoscendo la distanza alla quale era posizionato il target e applicandovi la formula matematica, secondo cui l'accomodazione è uguale all'inverso della distanza. In questo modo un soggetto che fissa ad una distanza di 0,40 cm accomoda di 2,50 diottrie.

Questa enunciazione teorica è ancora attualmente diffusa seppure più volte smentita sia clinicamente che sperimentalmente.

Nella realtà spesso accade che la risposta accomodativa per uno stimolo posto alla distanza stabilita dal target non è coincidente con la distanza stessa. Il fenomeno è determinato da alcuni fattori di natura ambientale che influenzano l'organismo e che come conseguenza producono una risposta accomodativa ridotta rispetto al necessario e, quantificabile in un valore di 0,50-0,75 diottrie che prende il nome di **Lag Accomodativo**.

La rilevazione del LAG mediante la schiascopia dinamica può fornire numerose informazioni sull'efficienza del sistema visivo durante attività visiva prossimale ed è auspicabile trovare un basso valore di LAG tale da scongiurare evoluzioni adattive nella visione prossimale.

La schiascopia dinamica viene effettuata con una luce ambientale bassa, affinché la midriasi consenta al riflesso del fondo oculare di apparire con una maggiore luminosità. Per consentire una buona visione della mira è necessaria una seconda sorgente luminosa diretta sul target.

Inizialmente la nostra idea era quella di effettuare la schiascopia dinamica su soggetti, di età compresa tra 20 e 30 anni, emmetropi o precedentemente emmetropizzati, facendo variare la temperatura-colore della seconda sorgente di luce, ma abbiamo riscontrato difficoltà dovute ad un'eccessiva diffusione della luce conseguentemente all'inserimento delle lenti.

Così abbiamo deciso di misurare l'entità massima di accomodazione che può essere esercitata da vicino sempre in soggetti giovani ed emmetropizzati.

Abbiamo scelto quattro sorgenti luminose di utilizzo comune con temperatura elevata, media e bassa, tra cui due sorgenti aventi la stessa temperatura (6000°K), ma che differiscono per azienda costruttrice, allo scopo di valutare l'influenza che tali sorgenti possano avere sulla funzione visiva e, in particolar modo sul comportamento dell'accomodazione.

CAPITOLO 1- Anatomia dell'occhio

1.1 L'occhio

L'occhio può essere descritto come un sistema ottico atto a trasformare un'informazione luminosa in impulsi nervosi al fine di ottenere una sensazione visiva che riproduca le informazioni dell'ambiente esterno.

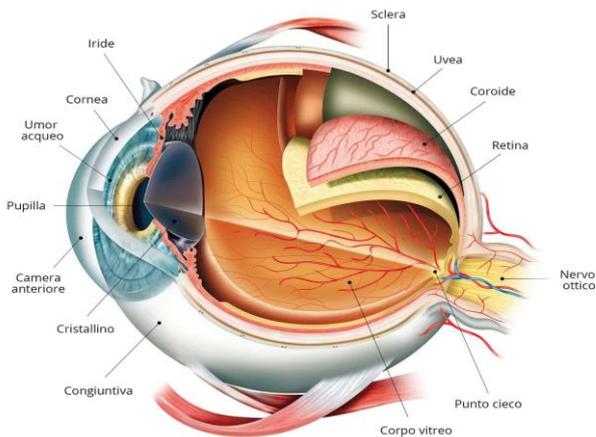


Figura 1 Anatomia dell'occhio

Come si può vedere dall'immagine, il bulbo oculare è composto da tre membrane sovrapposte.

La membrana più superficiale è la tunica fibrosa, che in un piccolo segmento anteriore, a contorno circolare, è trasparente e prende il nome di **cornea**; nella restante parte è opaca e si chiama **sclera**.

Segue la tunica vascolare, costituita posteriormente dalla **coroide** e, anteriormente forma, unendosi alla retina, il corpo ciliare e, più avanti l'iride. L'**iride** è un diaframma con un forame centrale circolare, la

pupilla, la sua funzione è quella di regolare la quantità di luce che entra nell'occhio.

La più profonda delle tre membrane è la **retina**, di natura nervosa e da cui ha origine il nervo ottico. La sua faccia posteriore è detta **parte ottica** della retina, essendo responsabile della funzione visiva. La faccia anteriore invece è detta **ora serrata**, non contiene elementi di natura nervosa.

All'interno del globo oculare, fra la cornea e l'iride, vi è la camera anteriore, riempita di un liquido trasparente, incolore e fluido come l'acqua, l'**umor acqueo**. Posteriormente alla camera anteriore, dietro l'iride e la pupilla, si trova il **cristallino**, connesso, per mezzo di un apparato di sospensione, la zonula ciliare, con la regione ciliare. Tra l'iride, il corpo ciliare e il cristallino è compresa la camera posteriore, comunicante con la camera anteriore lungo il margine della pupilla, ripiena anch'essa dello stesso umor acqueo. Il restante ampio spazio del bulbo oculare è occupato dal **corpo vitreo**, una sostanza di consistenza gelatinosa, incolore e trasparente.

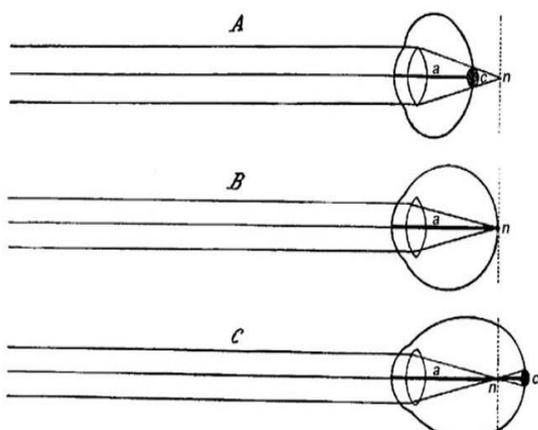


Figura 2 Rappresentazione schematica della rifrazione statica dell'occhio

1.2 L'occhio come diottra oculare

Cornea, umor acqueo, cristallino e corpo vitreo costituiscono i mezzi diottrici dell'occhio, che può essere considerato come una lente convergente dotata di un notevole potere refrattivo: circa 60 diottrie. Il centro ottico viene a trovarsi a circa 7mm dalla cornea, mentre il punto dove convergono i raggi luminosi paralleli (fovea), si trova a 24mm dalla cornea.

In un occhio perfettamente conformato e a riposo (con l'apparato di accomodazione inattivo), la lunghezza dell'asse ottico e il potere di rifrazione dell'apparato diottrico sono tali che gli oggetti posti a distanza infinita proiettano la loro immagine nella parte ottica della retina; in queste condizioni, l'occhio si dice **emmetrope**. Quando non esiste un giusto rapporto fra potere refrattivo e lunghezza dell'asse ottico si parla di ametropie: ipermetropia quando l'immagine si forma dietro la retina e miopia quando l'immagine si forma davanti alla retina.

CAPITOLO 2- Strutture coinvolte nel processo accomodativo

L'accomodazione è definita come "un aggiustamento del potere refrattivo dell'occhio". Questa variazione è generalmente involontaria ed è programmata per mettere a fuoco gli oggetti ad ogni distanza. Negli esseri umani questa variazione di potere è attribuita ad una variazione nella forma del cristallino.

Le strutture coinvolte in tale processo sono:

- il cristallino
- la zonula di Zinn
- il corpo ciliare

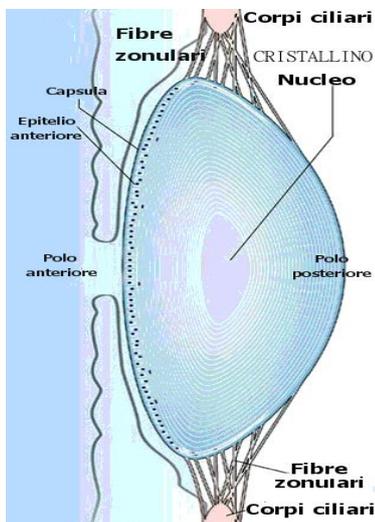


Figura 3 Anatomia del cristallino

2.1 IL CRISTALLINO

Il cristallino è una lente biconvessa, trasparente ed avascolare, situata tra iride e corpo vitreo. La faccia anteriore del cristallino è in contatto con la superficie posteriore dell'iride e presenta un raggio di curvatura, in condizioni non accomodate, di circa 12,8 mm mentre la faccia posteriore con un raggio di curvatura di 7,7 mm confina con la ialoide anteriore. Il diametro equatoriale è di 6,5mm alla nascita e raggiunge circa i 9 mm all'età di 15 anni mentre il diametro anteroposteriore è di 3,5 mm fino ad arrivare a circa 5 mm in età adulta. Esso fornisce circa 1/3 del potere

totale dell'occhio, circa 20 diottrie e presenta un diverso indice di rifrazione che varia aumentando verso il centro della lente, con un indice

al nucleo pari a 1.406.

Il cristallino si suddivide in vari strati, dall'esterno troviamo:

- la **capsula del cristallino**, o cristalloide, è una membrana continua che circonda da ogni lato il cristallino; è trasparente, molto elastica e friabile, più spessa nella porzione anteriore. Dà inserzione alle fibre della zonula ciliare e, facendo trazione su queste si ha il distacco di una lamella superficiale della capsula, detta

lamella zonulare o pericapsulare. Inoltre funge da barriera ed impedisce a grandi molecole, quali emoglobina ed albumina, di penetrare all'interno della lente.

- **l'epitelio germinativo** è costituito da un mono strato di cellule cuboidali posizionate esclusivamente sotto la capsula anteriore. Tali cellule possiedono un nucleo centrale ed un citoplasma provvisto di ribosomi, apparato di Golgi e mitocondri. Proliferano per suddivisione mitotica, successivamente si allungano e iniziano a migrare verso l'equatore. Durante questo processo di maturazione, il citoplasma perde la sua forma, il nucleo si frammenta per poi scomparire e la cellula acquista l'aspetto di una fibra lenticolare. Le nuove fibre vengono ad apporsi alle fibre più vecchie costituendo una struttura a strati concentrici.

- la **sostanza del cristallino**, che rappresenta la quasi totalità dell'organo, è formata dalle fibre lenticolari, caratterizzate dalla notevole lunghezza (fino a 8mm, quelle più superficiali), dalla struttura e dal modo di raggrupparsi. Sono dirette in senso meridiano, dalla parte anteriore a quella posteriore dell'organo; sono 55chiare, trasparenti e molto flessibili e sono unite tra loro da sostanza cementante. A seconda della posizione che occupano, vengono classificate in fondamentali, che formano il grosso strato corticale, intermedie, di transizione e centrali che formano il nucleo e hanno una forma prismatica, più corte e sottili delle precedenti.

2.1.2 CHIMICA DEL CRISTALLINO NORMALE

- **Contenuto di acqua:** la maggior parte dell'acqua contenuta nel cristallino (il 75% circa) appartiene alla corteccia, in quanto essa contiene le fibre più giovani. La disidratazione progressiva del cristallino con l'avanzare dell'età viene considerata come una delle cause della presbiopia.

- **Contenuto delle proteine:** il cristallino presenta il maggior contenuto di proteine, rispetto agli altri organi del corpo umano. Esse si suddividono in **solubili** ed **insolubili** (aminoacidi). In genere, la corteccia contiene più proteina solubile del nucleo, il quale è più ricco di proteine insolubili. Risulta che, quando il cristallino invecchia, la proteina solubile si converte in albuminoide insolubile. Oltre alle proteine, si trovano anche tracce di **glicoproteine, RNA, DNA e fosfoproteine.**

Le glicoproteine hanno la funzione di sostegno fra le varie fibre, conferendo compattezza ma non rigidità. Nel cristallino la compattezza è ovviamente necessaria per il mantenimento delle proprietà ottiche e la flessibilità è indispensabile perché possa avere luogo la variazione di curvatura delle facce con l'accomodazione.

- **Acqua ed elettroliti:** con il passare degli anni il cristallino aumenta di peso, in concomitanza con la perdita di acqua. La composizione degli elettroliti del cristallino è caratterizzata da elevato contenuto di ioni di potassio e basso contenuto di ioni di sodio e di cloro.

Il contenuto di calcio dell'umore acqueo è molto importante in relazione alla permeabilità della membrana del cristallino. In assenza di calcio, la permeabilità aumenta; con l'invecchiamento aumenta il deposito di calcio.

Nel cristallino il contenuto di ioni potassio è molto elevato e risulta superiore a quello degli altri tessuti dell'occhio. Il contenuto di magnesio è dello stesso ordine di quello del calcio.

- **Aminoacidi:** nel cristallino gli aminoacidi si accumulano per trasporto attivo. Esso acquisisce gli aminoacidi dall'umore acqueo, grazie all'attività metabolica dell'epitelio del cristallino stesso.

- **Concentrazione degli ioni idrogeno,** che nel cristallino ammonta a circa il 7%.

- **Pressione osmotica,** equivalente a quella di una soluzione di cloruro di sodio allo 0,91 %.

- **Contenuto lipidico:** 1,80% è rappresentato da fosfolipidi e colesterolo.

2.2 LA ZONULA DI ZINN

La zonula ciliare, o apparato sospensorio del cristallino è un sistema di fibre zonulari, tese fra il corpo ciliare e il cristallino. Nel suo insieme è un anello a forma di prisma triangolare: la base è alla zona equatoriale del cristallino e i lati, che gradualmente si incurvano come il bulbo oculare, si uniscono in un angolo acuto, che raggiunge l'ora serrata. La zonula serve a fissare il cristallino e, durante il riposo del muscolo ciliare, trovandosi in stato di tensione, mantiene il cristallino disteso in senso radiale e alquanto schiacciato. Quando il muscolo ciliare si contrae, le fibre si rilasciano e la convessità del cristallino aumenta.

2.3 IL CORPO CILIARE

Il corpo ciliare segue l'iride e si estende fino alla coroide, dalla quale è separata da un solco anulare, l'ora serrata. Nella superficie interna è rivestito dalla parte ciliare della retina, il cui strato esterno è fortemente pigmentato. Ha forma anulare e il suo spessore aumenta da dietro in avanti, risultando di forma triangolare nelle sezioni meridiane; è composto da un segmento superiore, l'**orbicolo ciliare**, un segmento anteriore, **la coroide ciliare** e dal **muscolo ciliare**.

I processi ciliari sono circa 70, disposti radialmente e si evidenziano per il loro colore bianco lucente sullo sfondo scuro della regione; hanno una lunghezza media di 2-3 mm, sono rigonfiati alla loro estremità anteriore e sono separati da solchi da cui sono tese fibre che vanno dal corpo ciliare alla zona equatoriale del cristallino.

Il muscolo ciliare occupa la parte antero-esterna del corpo ciliare, ha la forma di un anello prismatico triangolare, di colore bianco grigiastro.

Il muscolo è costituito da fascetti di cellule muscolari lisce, anastomizzate tra loro, e non raccolti in una formazione compatta, essendo intramezzati da tessuto connettivo e vasi.

Per la direzione che i fascetti di fibre assumono, si distinguono nel muscolo due porzioni:

una a **fibre meridionali** (del Brucke) che decorrono secondo i meridiani e si trovano nelle parti più superficiali del muscolo, connesse in avanti con il sistema trabecolare sclero-corneale, si prolungano indietro fino a raggiungere lo stroma dell'orbicolo ciliare e della coroide; l'altra a **fibre circolari** (del Muller), le quali costituiscono un anello che occupa l'angolo antero-interno del muscolo e che decorre parallelamente e in prossimità del margine ciliare dell'iride.

Le immagini sono diritte se riflesse da una superficie convessa, inoltre rimpiccioliscono all'aumentare della curvatura della superficie, sono, invece, capovolte se sono riflesse da una superficie concava.

La definizione del processo accomodativo, tutt'ora parziale è dovuta inizialmente ad H. Von Helmholtz e, per notevoli perfezionamenti, a E. Fincham, rispettivamente tra la fine dell'800 e i primi quarant'anni del 900.

3.2 FISILOGIA DELL'ACCOMODAZIONE

La variazione del potere del cristallino avviene grazie al muscolo ciliare e alle fibre zonulari. In sostanza il

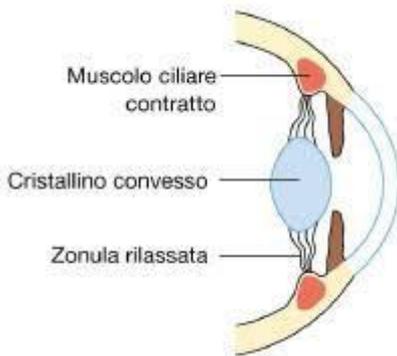


Figura 5 Il cristallino convesso

cristallino, essendo elastico, è capace di aumentare la sua curvatura e quindi convessità e spessore, se non viene più sottoposto a tensione delle fibre zonulari. Esso si avvicina alla cornea diminuendo la profondità della camera anteriore. Queste modificazioni fanno sì che il potere diottrico del bulbo oculare aumenti. Il muscolo ciliare è sotto il controllo del sistema nervoso parasimpatico, il sistema simpatico fa quindi da inibitore dello stesso. Il riflesso accomodativo coinvolge sia i centri integratori corticali che sottocorticali (mesencefalo). Le fibre afferenti decorrono nel II nervo cranico (ottico) mentre la via efferente

è costituita da fibre parasimpatiche che decorrono nel III nervo cranico (oculomotore) e innervano il muscolo ciliare. Il rilasciamento del muscolo ciliare con conseguente contrazione delle fibre zonulari provoca il processo inverso e cioè l'appiattimento delle superfici del cristallino e la diminuzione del suo spessore (accomodazione negativa). L'innervazione accomodativa, come quella pupillare, può essere attivata monocolarmente, ma si distribuisce in entrambi gli occhi, in condizioni normali, in misura esattamente uguale.

3.3 SEQUENZA BIOMECCANICA DELL'ACCOMODAZIONE

Quando l'impulso neurale giunge al muscolo ciliare avvengono diverse variazioni anatomiche dovute alla contrazione del muscolo stesso. Più nello specifico la contrazione del muscolo comporta uno spostamento anteriore del corpo ciliare il quale si porta verso l'interno diminuendo il proprio diametro. Il cristallino avanza leggermente assieme al muscolo ciliare mentre la coroida si stira per trazione delle fibre zonulari posteriori. I filamenti zonulari anteriori iniziano a diminuire la loro tensione sino a rilassarsi e grazie probabilmente alle proprietà della capsula e del cristallino in sé avviene un aumento della curvatura della lente. In concomitanza a questa variazione di curvatura, diminuisce il diametro equatoriale. Il raggio di curvatura della zona centrale della superficie anteriore varia sensibilmente a seconda dell'entità della risposta, mentre il raggio di curvatura posteriore varia in modo ridotto. Infine lo spessore centrale aumenta e l'intero cristallino, sotto la forza di gravità, si abbassa di poco. Va fatta un'importante osservazione, i

cambiamenti sequenziali di base biomeccanici ed anatomici che avvengono durante l'accomodazione vedono come unico elemento attivo il muscolo ciliare, tutti gli altri elementi variano in modo passivo. L'intero meccanismo accomodativo, dall'applicazione dello stimolo alla risposta completa, avviene approssimativamente in 1 secondo.

3.4 ACCOMODAZIONE RIFLESSA

In condizioni di visione normale l'accomodazione è un atto riflesso: il soggetto focalizza la sua attenzione su un oggetto e automaticamente, senza accorgersene, il cristallino modifica il suo potere.

Gli stimoli che provocano l'accomodazione riflessa provengono dalla collocazione che hanno gli oggetti osservati nello spazio. A seconda della natura dello stimolo, riconosciamo una:

- **accomodazione da sfuocamento**, un'immagine retinica sfuocata sollecita un'innervazione accomodativa atta a modificare il potere del cristallino al fine di ottenere un'ottimizzazione della messa a fuoco e, di conseguenza, una visione distinta.

- **accomodazione prossimale**, la percezione della vicinanza apparente di un oggetto può scatenare un'accomodazione positiva nonostante l'immagine sulla retina non sia sfuocata e non sia stata messa in atto la convergenza. L'informazione che arriva alla coscienza sulla distanza di un oggetto dipende dalle dimensioni apparenti dell'oggetto e dalle molteplici caratteristiche ambientali.

- **accomodazione da vergenze orizzontali**, la convergenza o la divergenza possono attivare l'accomodazione. All'aumentare della convergenza, aumenta anche il potere diottrico del cristallino, *accomodazione positiva*, mentre al diminuire della convergenza diminuisce anche il potere del cristallino, *accomodazione negativa*.

In condizione di visione normale la risposta accomodativa finale è costituita dalla somma delle modificazioni accomodative sollecitate contemporaneamente da stimoli accomodativi coerenti, ossia quando non esiste una discrepanza fra la distanza a cui l'oggetto sembra collocarsi, l'entità dello sfuocamento dell'immagine retinica e la convergenza degli assi visivi in atto.

3.5 ACCOMODAZIONE VOLONTARIA

Alcuni soggetti possono, entro i limiti, attuare volontariamente modifiche all'accomodazione anche in assenza di stimoli accomodativi o, al contrario, inibire delle modifiche dell'accomodazione nonostante la presenza di stimoli adatti a determinarle.

3.6 ACCOMODAZIONE TONICA

In assenza degli stimoli visivi che controllano l'accomodazione riflessa, come ad esempio al buio o in presenza di un campo uniformemente illuminato privo di elementi strutturali, o con stimoli con bassa frequenza spaziale, in ridotta illuminazione, il muscolo ciliare si trova in uno stato di contrazione che

conferisce al cristallino un valore diottrico superiore di circa 1-1,50 diottrie rispetto al potere diottrico che normalmente ha in condizioni di massima accomodazione negativa fisiologicamente ottenibile, realizzando così una condizione di “*miopizzazione*”, detta anche **dark focus**.

Questo fenomeno è definito *tono accomodativo* o *accomodazione tonica*, oppure *miopia notturna*.

Il tono accomodativo può variare in seguito all’innervazione a cui è stato sottoposto il muscolo ciliare precedentemente: se il tono accomodativo viene misurato subito dopo che l’occhio è rimasto per lungo tempo accomodato per vicino l’entità dell’accomodazione tonica risulterà più elevata- **adattamento accomodativo**.

3.7 ACCOMODAZIONE DINAMICA E ACCOMODAZIONE STATICA

- **L’accomodazione dinamica** rappresenta le modifiche del potere del cristallino che servono ad adeguare la messa a fuoco a diverse distanze di osservazione. Le modifiche dello stato di contrazione del muscolo ciliare sono sostenute da un’innervazione rapida allo scopo di modificare il più velocemente possibile il potere del cristallino al fine di fornire un’immagine distinta dell’oggetto fissato.

Lo stato di efficienza dell’accomodazione dinamica si manifesta sia con l’entità delle modificazioni dell’accomodazione che possono essere prodotte - *ampiezza accomodativa*- che con la rapidità con cui queste variazioni si effettuano -*facilità accomodativa*-

- **L’accomodazione statica** consiste nel mantenimento di un determinato livello innervativo del muscolo ciliare destinato alla messa a fuoco già instaurata di un oggetto che conserva una distanza fissa nello spazio. Ciò richiede il mantenimento di uno stato di contrazione costante del muscolo ciliare che può essere considerato il risultato di un’innervazione lenta affinché sia mantenuto nel tempo questo livello innervativo, lasciando libera la componente innervativa riflessa di rispondere a qualsiasi successiva modifica degli stimoli accomodativi.

3.8 PUNTO PROSSIMO, PUNTO REMOTO, AMPIEZZA ACCOMODATIVA

- **Il punto prossimo (PP)** di un occhio è il fuoco coniugato della sua macula in condizione di massima accomodazione positiva. Rappresenta la distanza minima a cui un soggetto può percepire ancora le immagini nitidamente mettendo in gioco tutta l’accomodazione di cui dispone. Il valore del punto prossimo può essere espresso in diottrie equivalenti all’inverso della distanza che lo separa dall’occhio espressa in metri.

- **Il punto remoto (PR)** è il punto coniugato della retina in condizione di refrazione statica, è reale e positivo in un miope (si forma davanti all’occhio) è, invece, virtuale e negativo nell’ipermetrope (si forma dietro l’occhio). Il punto remoto espresso in diottrie rappresenta la refrazione statica dell’occhio.

- **L’ampiezza accomodativa**, ossia la variazione di potere che il cristallino è capace di effettuare, è definita dalla differenza diottrica tra il valore del punto prossimo e quello del punto remoto:

$$AA=PP-PR$$

Nel caso di un occhio emmetrope che ha il punto remoto all'infinito e il punto prossimo a 20 cm:

$$AA = (1/0,20m) = 5D$$

L'ampiezza accomodativa è di 5 diottrie, permette la messa a fuoco di oggetti posti in un intervallo compreso tra l'infinito e un punto a 20 cm dall'occhio.

La misura lineare dell'intervallo entro il quale una data ampiezza accomodativa assicura una visione distinta si chiama **estensione accomodativa**. Le sue dimensioni e la sua collocazione nello spazio sono legate alla refrazione statica dell'occhio.

3.9 MISURA DELL'AMPIEZZA ACCOMODATIVA

I metodi più utilizzati per misurare l'ampiezza accomodativa sono:

- **metodo del punto prossimo.** Il metodo più semplice e diffuso per determinare l'ampiezza accomodativa è il metodo del punto prossimo. Ma perché conoscendo il PP possiamo conoscere l'ampiezza accomodativa? Precedentemente abbiamo visto la regola di Donders: $AA=PP-PR$ (espressi in diottrie). Se il punto remoto è all'infinito, ossia $PR=0$ allora $PP=AA$. Quindi in conclusione una volta emmetropizzato il soggetto (portato il PR all'infinito), misurando la distanza occhio-PP, conosco l'ampiezza accomodativa dello stesso. Per tale test è consigliata una colonna di lettere stampata su cartoncino, avvicinando quest'ultimo agli occhi del soggetto il quale dovrà arrestare l'avvicinamento ai primi segni di sfocamento. L'inverso della distanza (in metri) tra piano degli occhiali e punto in cui si avverte il primo sfocamento (PP) rappresenta l'ampiezza accomodativa.

- **metodo delle lenti negative.** L'ampiezza accomodativa può essere misurata monocolarmente antepoendo delle lenti negative di potere crescente in visione da lontano. Questo perché il cristallino accomoderà di una quantità uguale e opposta per compensare l'effetto delle lenti. La lente immediatamente precedente a quella che da un primo sfocamento rappresenterà l'ampiezza accomodativa del soggetto. Anche questo metodo va eseguito dopo l'emmetropizzazione. Questo test può essere eseguito anche da vicino con le stesse condizioni appena descritte, utilizzando un ottotipo per vicino e facendo guardare i caratteri di un paio di decimi inferiori a quelli raggiunti da lontano, e applicando la formula:

$$AA=1/x - P$$

x= distanza dell'ottotipo

P= potere della lente immediatamente precedente a quella che da primo sfocamento

3.10 MISURA DELLA FACILITA' ACCOMODATIVA

L'effettiva variazione della curvatura del cristallino dopo la presentazione di uno stimolo richiede un certo tempo, questo tempo designa la facilità accomodativa. Nei soggetti che non hanno deficit dell'accomodazione è in media di un secondo. Si fa osservare al soggetto un ottotipo posto a 5 m e un altro posto a 40 cm. Si invita lo stesso a spostare lo sguardo da un ottotipo all'altro solo quando l'immagine risulta perfettamente a fuoco. Il passaggio da visione a fuoco da lontano a vicino o viceversa è detto ciclo, nei soggetti giovani si può arrivare anche a 20 cicli al minuto.

3.11 ANOMALIE DELL'ACCOMODAZIONE

3.11.1 Fattori funzionali di influenza

Di interesse optometrico, invece, sono disordini di tipo funzionale che possono presentarsi in assenza di patologie proprie e che sono caratterizzati da un'alterata risposta accomodativa come ad esempio:

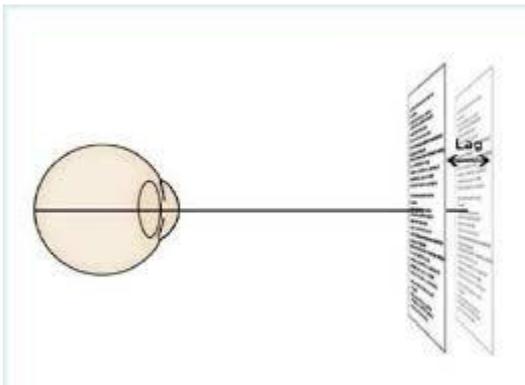


Figura 6 LAG accomodativo

Lag accomodativo

L'accuratezza dell'accomodazione consiste nella corrispondenza tra il valore diottrico della distanza a cui si trova l'oggetto osservato e la reale accomodazione messa in gioco dal cristallino (considerando un occhio emmetrope o emmetropizzato). Ad esempio un occhio emmetrope, per una visione nitida a 40 cm deve instaurare una accomodazione pari a $1/0,40m = 2,50D$. Ma ciò non avviene!

L'accomodazione messa in gioco per la visione di un oggetto non corrisponde al valore diottrico della distanza alla quale si

trova lo stesso, tale discordanza prende il nome di **lag accomodativo**. L'accomodazione lavora per così dire al risparmio e tende a scostarsi in posizione di riposo, per quel tanto che basta ad avere un'immagine retinica sufficientemente nitida per la percezione dei dettagli. Esiste, quindi, sempre una sorta di ipoaccomodazione fisiologica. L'accuratezza accomodativa può essere esaminata tramite la schiascopia dinamica. Ci si mette alla stessa distanza a cui si trova l'oggetto osservato, se si è nel punto neutro (pupilla illuminata uniformemente), l'accomodazione impiegata è accurata. Se l'accomodazione è insufficiente il movimento della striscia sarà concorde, se è in eccesso il movimento sarà discorde, entrambe tanto più evidenti quanto più è inaccurata l'accomodazione.

Facendo fissare un oggetto posto a circa 40cm si riscontra abitualmente un'insufficienza dell'accomodazione di circa 0,50-0,75 diottrie.

INSUFFICIENZA ACCOMODATIVA

Con insufficienza accomodativa si intende l'impossibilità o la difficoltà, perenne o occasionale, di mettere a fuoco oggetti ravvicinati. Ciò può essere causato da insufficienza dell'ampiezza accomodativa o da insufficienza dell'estensione accomodativa.

- **Insufficienza dell'ampiezza accomodativa:** tale tipo di insufficienza nella maggioranza dei casi è causata da un deficit dell'innervazione del muscolo ciliare. Tale deficit può essere causato anche da glaucoma o cataratta iniziale. Per far fronte a questa problematica bisogna prescrivere prudentemente lenti positive destinate a compensare la stessa insufficienza.

- **Insufficienza dell'estensione accomodativa:** si riscontra principalmente quando un soggetto ipermetrope non corretto, pur avendo un'ampiezza accomodativa giusta in rapporto all'età, dissipa gran parte di quest'ultima per correggere la sua ametropia. In questo caso bisogna prescrivere le lenti positive che compensino l'ipermetropia così da permettere al soggetto di utilizzare l'accomodazione esclusivamente per la visione prossimale.

PARALISI DELL'ACCOMODAZIONE

In questo caso, l'ampiezza accomodativa può essere ridotta (*paresi*), o del tutto assente (*paralisi*). I disturbi provocati dalla paralisi dell'accomodazione sono proporzionali all'importanza che l'attività dell'accomodazione ha nell'adempiere alla funzione visiva.

Un sintomo caratteristico della paralisi dell'accomodazione è la **micropsia**: gli oggetti appaiono rimpiccioliti, in quanto il soggetto per vederli distintamente, deve impegnare un'innervazione molto maggiore rispetto a quella necessaria dalla distanza dagli occhi dell'oggetto osservato.

SPASMO ACCOMODATIVO, ANISOACCOMODAZIONE, ASTENOPIA ACCOMODATIVA

- Lo **spasmo dell'accomodazione** consiste nella contrazione totale del muscolo ciliare e provoca miopie consistenti. Spesso si accompagna a miosi pupillare e convergenza degli assi visivi.
- Con il termine di **anisoaccomodazione** si intende una diversa ampiezza accomodativa tra i due occhi. Può essere causata da una cattiva ricezione dello stimolo dovuta a: anomalie organiche (es. opacità dei mezzi), disturbi dell'innervazione ciliare, alterazioni dello stesso muscolo ciliare o della plasticità del cristallino.
- Per quanto riguarda l'**astenopia accomodativa**, si designano sotto questo problema tutti i disturbi che causano impossibilità o meglio difficoltà a proseguire per lungo tempo un lavoro da vicino.

3.11.2 Fattori patologici di influenza

Esistono varie patologie causa di alterazioni nella risposta accomodativa come il glaucoma o il diabete (Ball, 1952). Tra le patologie o alterazioni fisiologiche che invece portando ad una differente risposta accomodativa nei due occhi troviamo:

- oftalmoplegia interna causata dalla sifilide (Charman W. M, 1998)
- paralisi del terzo nervo cranico (nervo oculomotore), è una rara condizione nel quale l'accomodazione non risponde alla stimolazione e può essere causata da molteplici fattori come traumi malattie sistemiche intossicazioni (Burns C. R., 2011) (Millodot M., 2004)
- danni alla porzione cervicale del sistema nervoso simpatico (Ball, 1952)
- paralisi cerebrali (Saunders, 2009)
- ambliopia funzionale (Scheiman M., 2014)
- una non uniforme sclerosi del cristallino (Marran L., 1999).

Oltre a queste condizioni è possibile rilevare una risposta accomodativa alterata da farmaci di utilizzo più o meno frequente. Tra queste sostanze troviamo (Smith J. L., 1999):

- alcune molecole utilizzate per farmaci antipsicotici
- alcune molecole utilizzate per farmaci antidepressivi
- farmaci anticolinergici.

CAPITOLO 4- La luce e l'occhio

Il **sistema visivo** è l'insieme delle strutture coinvolte “ nella conversione della luce nella sensazione e nelle percezioni della visione” (Mecacci et al. 1986).

La *vista* si differenzia dalla *visione*, in quanto si riferisce al semplice atto visivo della formazione dell'immagine retinica e conversione della luce come sensazione, mentre la visione ne indica l'aspetto percettivo.

4.1 LA LUCE

Il termine luce rappresenta l'insieme delle radiazioni che suscitano una sensazione visiva.

Non sempre, però, le radiazioni visibili sono capaci di stimolare l'occhio ed essere propriamente viste, ciò dipende da particolari condizioni dell'apparato visivo.

Lo **spettro visibile** è caratterizzato da due parametri fisici:

- *lunghezza d'onda* (λ) e frequenza (Hz), che sono inversamente proporzionali, a cui corrisponde la sensazione psichica del colore;

- *caratteristiche fotometriche*, ossia la quantità di energia posseduta, alla quale corrisponde la sensazione di brillantezza.

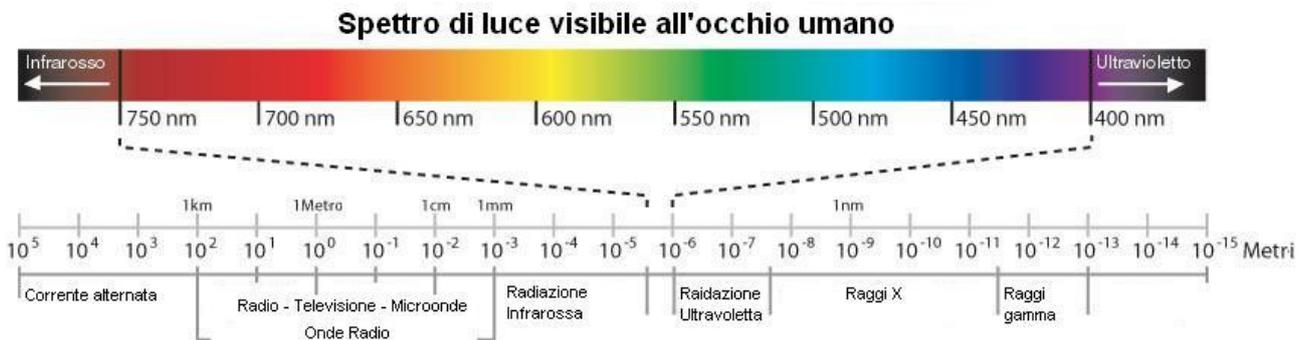


Figura 7 Spettro della luce visibile all'occhio umano

Lo spettro visibile è compreso in quella regione di radiazioni elettromagnetiche che hanno una lunghezza d'onda compresa tra i 400nm e i 750nm circa. Questa porzione di radiazioni elettromagnetiche può essere rilevata da fotorecettori retinici e rappresenta il cosiddetto stimolo adeguato per l'occhio umano. L'occhio umano presenta una sensibilità diversa per le diverse lunghezze d'onda:

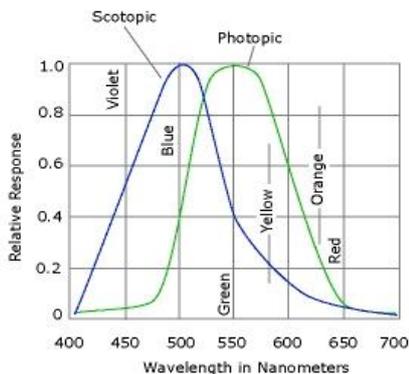


Figura 8 Sensibilità dell'occhio umano al variare della lunghezza d'onda

- **sensibilità fotopica**, (in condizioni di intensità di luce medio-alta), massima per lunghezze d'onda di 555nm (luce giallo-verde), mentre al di sotto dei 450nm e al di sopra dei 670nm la sensibilità è ridotta del 5% rispetto a quella massima;
- **sensibilità scotopica**, (in condizioni di luce scarsa), spostata verso le piccole lunghezze d'onda e ha un massimo per $\lambda = 508\text{nm}$ (circa).

4.2 EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI

Le radiazioni che non fanno parte dello spettro visibile possono avere effetti termici, chimici o meccanici sui tessuti biologici.

La retina percepisce la radiazione sotto forma di calore, che fino ad alcuni gradi viene disperso dalla circolazione coroidale, oltre causerebbe un'ustione.

La *porzione IR* può essere percepita come *calore* e causare lesioni termiche ai tessuti corneale, congiuntivale, cristallino e retinico. Anche se la radiazione raggiunge la retina i fotorecettori non sono in grado di rilevare stimoli con tale lunghezza d'onda, per questo un'emissione IR appare "nera" o inesistente. La *porzione UV* viene assorbita dai mezzi ottici oculari, tuttavia può causare ustioni attraverso una moria di cellule (potere abiotico) che a livello corneale e congiuntivale può manifestarsi con arrossamento,

lacrimazione o fotofobia. Il potere abiotico dell'UV può essere utile a distruggere i microrganismi. Ad esempio, nelle sale chirurgiche si usano lampade a forte emissione di UV per favorire il mantenimento della sterilità durante le ore di inattività.

Le *microonde* e le *radioonde* inducono alterazioni termiche a breve termine.

4.3 ILLUMINAZIONE NATURALE E ARTIFICIALE

L'*illuminazione naturale* è la radiazione visibile prodotta dalla massa solare e sottoposta alla filtrazione dell'atmosfera da parte dell'ozono, del vapore acqueo (vicino IR), dell'ossigeno (spettro centrale) e dell'anidride carbonica (IR). Si presenta come uno spettro continuo con maggiore emissione nella parte centrale dello spettro visibile. La distribuzione dell'energia emessa varia nell'arco della giornata e in condizioni atmosferiche.

L'*illuminazione artificiale* ad opera di generatori luminosi dipende dal sistema di produzione della radiazione:

- **sistema a incandescenza**, produce luce quando raggiunge una certa temperatura, come le comuni lampadine; produce emissione continua nel tempo, ma presentano un basso rendimento (elevato consumo-ridotta emissione luminosa).
- **sistemi fluorescenti**, producono emissione discontinua nel tempo che può causare una percezione di sfarfallamento della luce, che si può evitare con opportune strategie; hanno un buon rendimento e ridotta dispersione termica (neon).
- **sistemi a scarica**, l'illuminazione stradale avviene tramite sistemi a scarica a vapori di mercurio che presentano un picco per il blu-verde non percepibile visibilmente e, sistemi a vapore di sodio con emissione nel giallo; producono emissione discontinua e slittamenti cromatici.
- **laser**, è acronimo dell'espressione Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation; nella chirurgia oftalmica sono utilizzati laser a emissione rossa o IR perché assorbiti dall'emoglobina sanguigna, per cui la lunghezza d'onda di emissione va scelta in base al tessuto che la dovrà assorbire o trasmettere.
- **LED**, hanno emissione monocromatica variabile e, pertanto se usati singolarmente impediscono la visione cromatica; per dare luce bianca bisogna combinare alcuni *LED* di colore primario.

❖ LAMPADE AD INCANDESCENZA

L'elemento incandescente è un sottilissimo filamento metallico (tungsteno o altri materiali), contenuto in un'ampolla (bulbo), attraversato da corrente elettrica, continua o alternata, che ne provoca, per effetto Joule, il surriscaldamento fino a circa 2800°K e la conseguente irradiazione nello spettro visibile. La luce ha una tipica tonalità "calda" e un ottimo valore di resa cromatica. Modesta invece l'efficienza luminosa, pari in media a 12 lm/W per una lampadina da 100 W.

❖ **LAMPADA AD INCANDESCENZA ALOGENA**

La lampada alogena è una particolare lampada ad incandescenza, la differenza sta nell'aggiunta di iodio o di altri alogeni che permette un riscaldamento del filamento fino ad oltre i 3000°K, provoca anche una reazione col tungsteno che evapora. Il composto entrando in contatto con il filamento incandescente si decompone, facendo depositare di nuovo il tungsteno sul filamento creando così un ciclo continuo che ne allunga la vita media, il ciclo alogeno. La durata di questo tipo di lampada è quasi il doppio rispetto a quella tradizionale, circa 2000h. L'efficienza luminosa è pari a 16-30 lm/W. La temperatura di colore è circa 2900-3500°K, hanno un costo più elevato e sono molto più delicate.

❖ **LAMPADE FLUORESCENTI**

Le lampade fluorescenti sono costituite da un tubo in vetro, sagomato in diverse forme, al cui interno prima viene praticato il vuoto e poi si introduce un gas nobile (argon, xeno, neon o Kripton) a bassa pressione ed una piccola quantità di mercurio liquido, che evaporando in parte si mescola al gas nobile. Appartengono alla famiglia delle lampade a scarica. L'emissione del vapore di mercurio a bassa pressione è costituita da radiazioni ultraviolette e grazie alla polvere di fosforo vengono convertite in radiazioni visibili. L'efficienza luminosa più alta rispetto alle lampade ad incandescenza è circa 45-100 lm/W ma con il passare delle ore di funzionamento essa può cambiare, stessa cosa vale per la vita media, fortemente influenzata da accensioni e spegnimenti, oscilla tra 5000-10000 ore. La resa cromatica varia tra 60-95, a seconda dei modelli, mentre la temperatura di colore dipende dai fosfori.

4.4 LAMPADE A LED

Il **LED** fece la sua comparsa per la prima volta negli Anni 70 in America, dove fin da subito furono chiari ed evidenti i vantaggi che assicurava in termini di efficienza, durata e minor impatto ecologico. Solo negli ultimi anni si è scoperta la sua forza commerciale che deriva dal fatto di ottenere una elevata luminosità (quattro volte maggiore delle lampade tradizionali, fluorescenti e filamento di tungsteno), un basso prezzo, una elevata efficienza ed infine un'affidabilità senza eguali (la durata di un LED è di uno-due ordini di grandezza superiore a quella delle classiche sorgenti luminose).

- I primi LED erano disponibili solo nel colore rosso. Venivano utilizzati come indicatori nei circuiti elettronici, nei display a sette segmenti e negli optoisolatori. Successivamente vennero sviluppati LED che emettevano luce gialla e verde e vennero realizzati dispositivi che integravano due LED, generalmente uno rosso e uno verde nello stesso contenitore, permettendo di visualizzare quattro stati (spento, verde, rosso, verde+rosso=giallo) con lo stesso dispositivo. Successivamente abbiamo ritrovato i LED sulle scenografie teatrali (nei riflettori) o nelle lampade flash ad alta potenza e perfino nei proiettori per auto, fino ad arrivare ad oggi, dove i LED vengono impiegati nella

illuminazione pubblica come in quella privata, invadendo ogni spazio e ambiente grazie ai molti vantaggi che comportano.

- Una lampadina led è composta da diversi elementi, precisamente una serie di **semiconduttori assemblati** e che vengono fasciati da una guarnizione di finitura trasparente. Più precisamente il LED (**Light Emitting Diode**) è un dispositivo semiconduttore che genera luce al passaggio di cariche elettriche attraverso una giunzione in silicio opportunamente drogata: è un **diodo** che al raggiungimento della tensione di soglia (generalmente da 3 a 5 V) diventa una sorgente luminosa; la luce emessa dalla giunzione è monocromatica e il colore dipende dal tipo di drogaggio volutamente introdotto nel silicio. In commercio esistono differenti tipi di LED: **LED di potenza Golden Dragon e Platinum Dragon**, questi sono progettati per essere sorgenti d'illuminazione e per questo si differenziano dagli altri LED utilizzati per segnalazione in cruscotti e display.

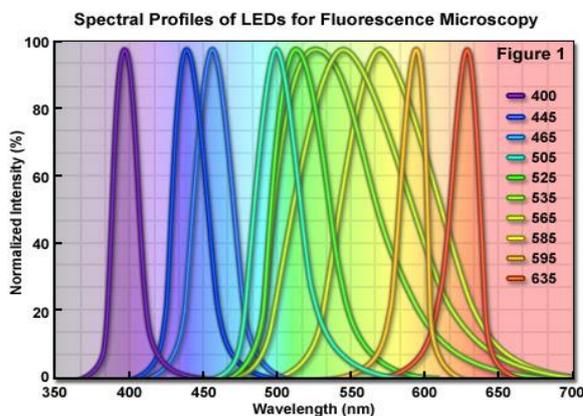


Figura 9 Profilo dello spettro dei LED per microscopia a fluorescenza

- La **luce bianca dei LED** viene generata partendo dall'emissione di un diodo a luce blu. Tale emissione viene sfruttata per stimolare una specifica polvere fluorescente ed ottenere in risposta un'emissione secondaria gialla. In presenza della giusta concentrazione di materiale fluorescente, la luce primaria blu si combina con quella secondaria gialla in modo da creare una distribuzione spettrale percepita come colore bianco dall'occhio umano. A seconda del drogante utilizzato, i LED producono i seguenti **colori**:

AlGaAs – rosso ed infrarosso

GaAlP – verde

GaAsP – rosso, rosso-arancione, arancione, e giallo

GaN – verde e blu

GaP – rosso, giallo e verde

ZnSe – blu

InGaN – blu-verde, blu

InGaAlP – rosso-arancione, arancione, giallo e verde

SiC come substrato – blu

Diamante (C) – ultravioletto

Silicio (Si) come substrato – blu (in sviluppo)

Zaffiro (Al₂O₃) come substrato – blu

4.4.1 I 10 VANTAGGI DELLA LUCE LED

1. **Efficienza elettrica** in continuo aumento (sorgente di luce – elevata luminosità);
2. **minimo riscaldamento** degli oggetti illuminati;
3. **accensione istantanea** (non serve attendere per avere l'elevata luminosità);
4. accensione possibile anche a **bassissime temperature** (-40 °C);
5. alimentazione in **bassissima tensione** in corrente continua (risparmio energetico);
6. **elevata resistenza** meccanica e alle vibrazioni (affidabilità senza eguali);
7. **durata** di funzionamento (LED ad alta emissione arrivano a circa 50.000 ore);
8. **luce pulita** perché priva di componenti IR e UV;
9. **colori saturi**.
10. **ridottissimi costi** di manutenzione dati dalla loro grande affidabilità.

4.5 TEMPERATURA COLORE

La luce è costituita da un insieme di diversi colori. La luce che gli esseri umani considerano "neutra" è quella bianca del sole a mezzogiorno (intorno ai 5500 K, come vedremo) che è l'insieme equilibrato di tutti i colori, cioè di tutte le frequenze che compongono lo spettro visibile.

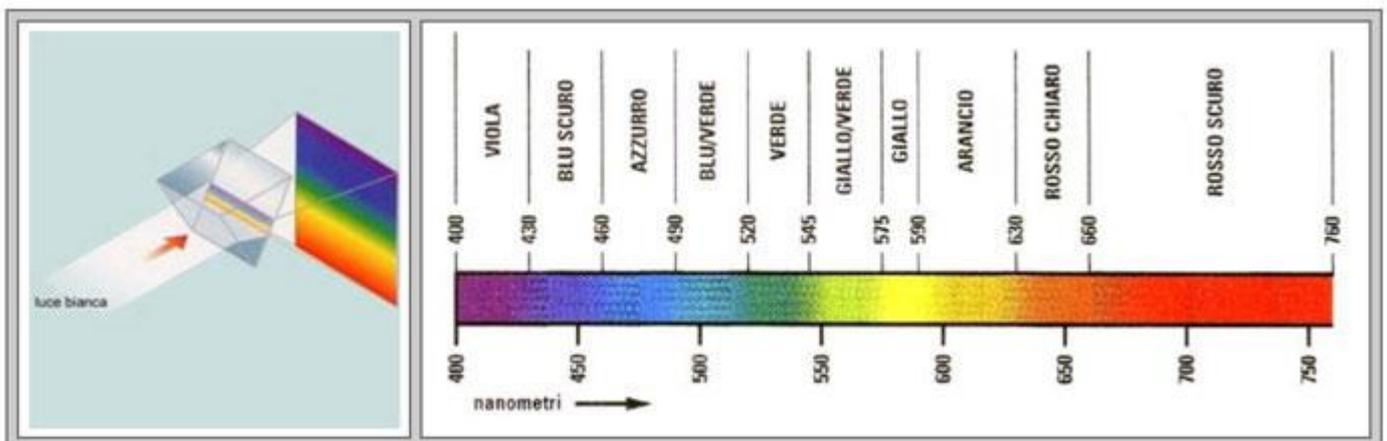


Figura 10 Spettro della luce visibile

La gran parte delle luci, però, non è "neutra": alcuni dei colori che le compongono possono essere più forti e in questo caso si dicono "dominanti", oppure assenti.

L'occhio umano è in grado di percepire la presenza di alterazioni rispetto alla luce "neutra", ma il cervello umano, quando può, le compensa, e interpreta come "bianco" lo stesso colore visto sotto una luce al tungsteno, sotto una luce al neon o sotto un cielo coperto. Nella realtà quel bianco, nelle tre diverse situazioni, non è "puro", ma ha una sfumatura rossastra nel primo caso, verdastra nel secondo, bluastra nel terzo. I diversi tipi di luce hanno cioè quasi sempre una dominante, o colore dominante, con la quale velano quel che illuminano. Se infatti il bianco non è puro, anche tutti gli altri colori sono influenzati di conseguenza. A volte ci si riferisce a queste caratteristiche della luce come "qualità della luce" o "qualità del colore della luce".

Le luci al tungsteno hanno una dominante rossastra, quelle al neon verdastra. E la luce solare, del resto, cambia a seconda delle ore del giorno, della stagione e delle condizioni atmosferiche. Nella luce solare possono esserci delle dominanti di colore più calde (ad esempio nel tardo pomeriggio) oppure fredde (ad esempio in caso di cielo nuvoloso) e di conseguenza le immagini presenteranno un carico maggiore di sfumature gialle nel primo caso oppure blu nel secondo. La luce del sole inoltre è più neutra della luce a pieno cielo.

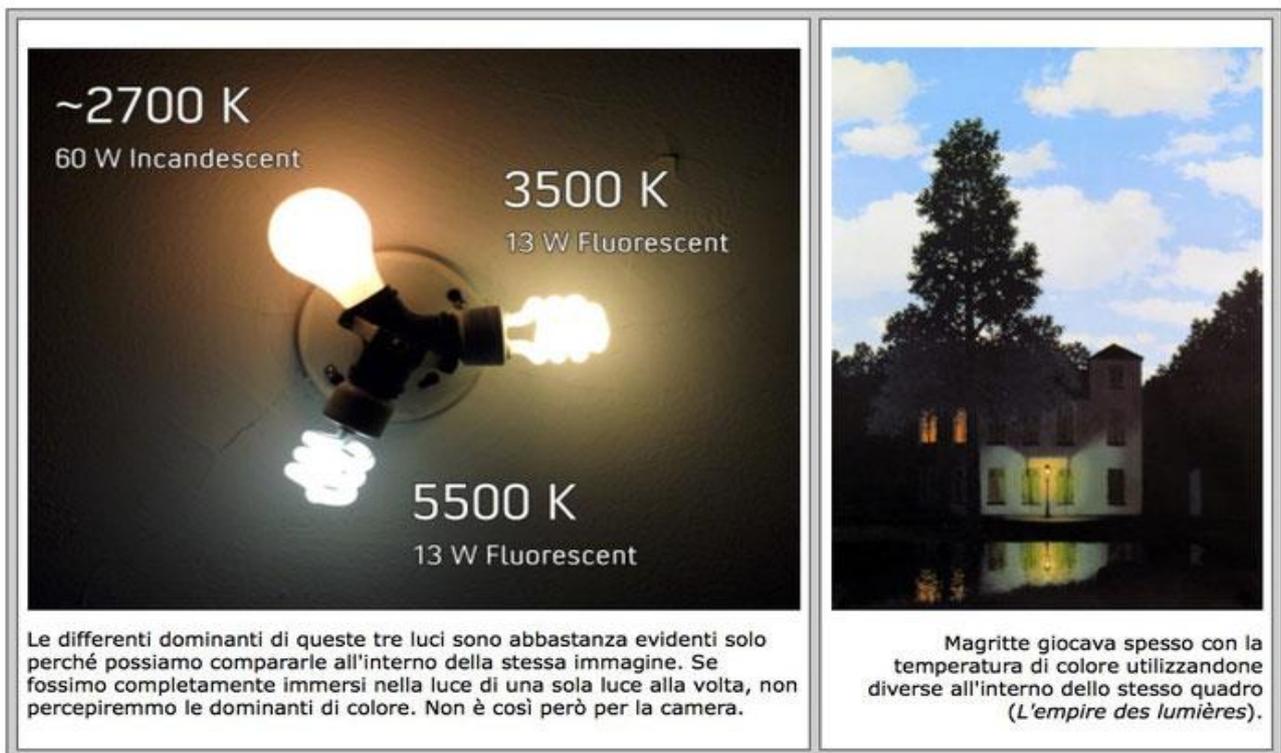


Figura 11 Tre componenti della temperatura colore

Il cervello umano, dunque, realizza una sorta di riequilibrio, facendoci percepire la gran parte dei colori come appropriati, anche se non lo sono nella realtà. Per questo il colore di un volto ci pare più o meno identico passando da un ambiente con illuminatori a incandescenza ad uno con luce del sole. Il nostro cervello nel passaggio da un ambiente all'altro si adegua rapidamente e non ci fa percepire la differenza della qualità della luce e dunque la variazione dei colori. Teniamo conto comunque che in un ambiente con luci dalla dominante particolarmente accentuata, ad esempio le luci di una discoteca, il bilanciamento naturale non è possibile ed anche l'incarnato ci appare con tinte diverse dal solito. Allo stesso modo quando siamo immersi in una stanza illuminata da una lampada a incandescenza non percepiamo la sua dominante giallo-arancio, che invece appare evidente se la stessa luce la vediamo fuori, sotto un cielo notturno.

Quel che il cervello umano non percepisce lo registrano però i mezzi di ripresa. In assenza di interventi di bilanciamento che riportino il bianco (e dunque i colori che lo costituiscono) a un bianco "puro", le immagini riprese con luci a dominante di colore non avranno colori appropriati.

Per non trovarci con immagini rossastre in presenza di lampade al tungsteno, oppure con immagini a dominante bluastra in esterni, non possiamo fidarci della nostra visione e dobbiamo quantificare e misurare la qualità della luce, così da adeguare i mezzi di ripresa o le fonti di luce. Il fine è quello di neutralizzare l'eventuale dominante e rappresentare i colori in maniera correttamente bilanciata. La temperatura di colore viene incontro a questa esigenza di misurazione.

La temperatura di colore quantifica (traduce in numeri) la tonalità prevalente della luce, cioè qual è il suo colore dominante. Ogni tipo di luce ha una sua temperatura colore. La temperatura di colore si misura in gradi kelvin (K). La scala kelvin è diversa da quella Celsius (°C) che usiamo comunemente. Lo zero della scala kelvin corrisponde allo zero assoluto di temperatura, che è pari a -273 °C. Dunque per convertire in Kelvin un valore di temperatura espresso in Celsius, occorre sommare il numero 273.

In che maniera una certa tonalità dominante di luce è stata associata ad una "temperatura"? Un metallo che venga progressivamente riscaldato diviene incandescente ed emette luce con dominanti differenti a seconda della temperatura a cui è esposto. Alle temperature più basse corrisponde il giallo-arancio, salendo di temperatura la luce che il metallo emette si fa dapprima più bianca, quindi azzurra, violetta ed ultravioletta. In fisica per stabilire una scala assoluta di valori, non si è preso a riferimento un metallo realmente esistente, ma un metallo teorico, chiamato corpo nero, che si immagina puro e in grado di assorbire luce (ed emetterla) senza rifletterla; in questo modo la luce che emette dipende esclusivamente dalla temperatura (e non dalla riflessione). Una certa temperatura di colore dunque corrisponde alla tonalità di luce che emetterebbe un corpo nero portato ad incandescenza a quella temperatura.

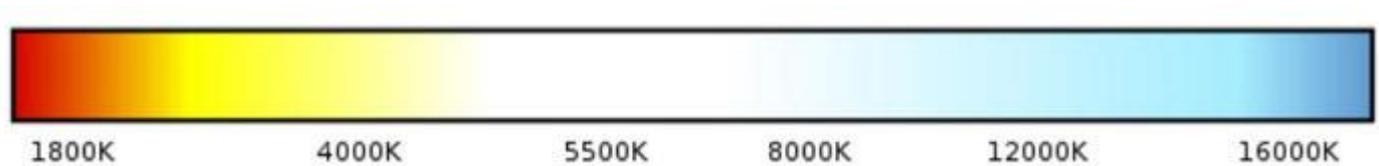


Figura 12 Rappresentazione temperatura colore

Quindi ad una temperatura colore più bassa corrisponde una luce più calda, tendente al rosso, ad una temperatura più alta corrisponde una luce più fredda tendente, invece, all'azzurro.

Il filamento incandescente di una lampada al tungsteno non ha per forza un calore di 3200 K ma la sua luce ha lo stesso colore di quello che emetterebbe un corpo nero a 3200 K.

Le luci al neon si surriscaldano a temperature inferiori a 4200 K, ma emettono la luce che il corpo nero emetterebbe a quella temperatura. Quindi la temperatura colore non va confusa con la temperatura che una lampada può raggiungere.

Teniamo conto comunque che la luce è costituita da molti colori: la temperatura colore è in grado di darci un'informazione abbastanza esatta sul suo colore dominante, ma non sul resto dei colori.

Vi sono luci che, ad esempio, sono prive di determinati colori. Per questo, a livello professionale, si deve conoscere l'intero spettro di emissione di una luce, cioè la presenza e la forza di tutti i colori che la costituiscono, altrimenti corriamo il pericolo, ad esempio, di realizzare riprese che hanno magari neutralizzato la dominante rossa, per lasciarne però una eccessiva, o assente, sul verde. Gli spettri di emissione delle luci possono essere rappresentati graficamente. Questi grafici, che accompagnano gli illuminatori nella vendita e nel noleggio, si chiamano SED (Spectral Energy Distribution) o SPD (Spectral Power Distribution), e mostrano l'intensità di ogni colore presente in una determinata luce. I colori sono rappresentati sull'asse delle ascisse dalla lunghezza d'onda dei colori, espressi in nanometri (i rossi ad esempio sono tra i 625 e i 700 nm).

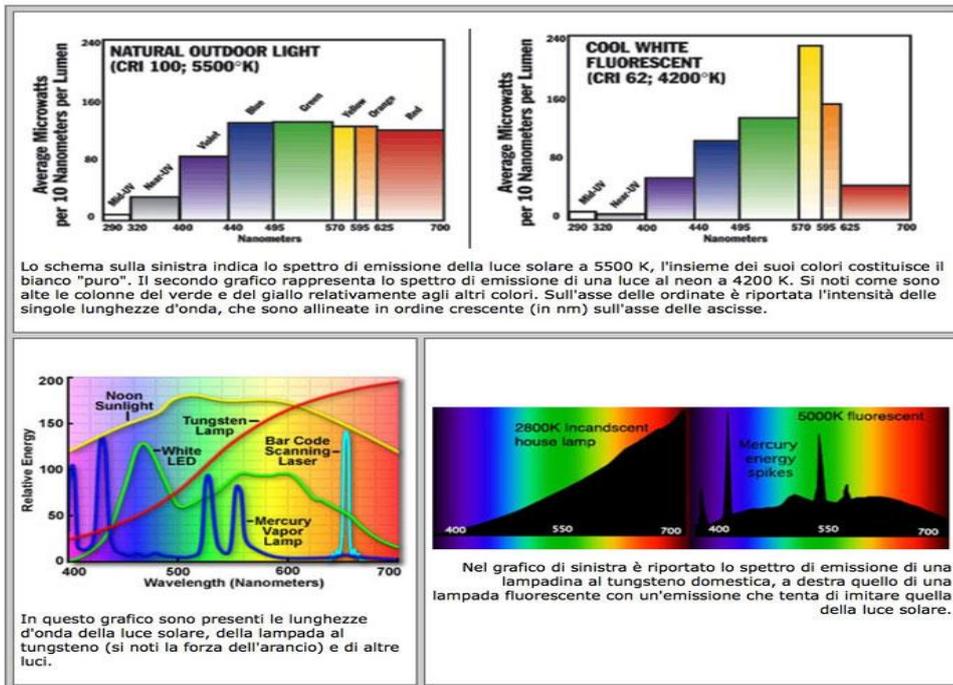


Figura 13 Spettro luce solare; spettro luce al neon, spettro lampada al tungsteno; spettro lampada fluorescente.

La percezione visiva di cambiamento dei colori è inversamente proporzionale alla temperatura di colore. Ad esempio a basse temperature la variazione di colore diviene percepibile anche con lo spostamento di soli 50°K, sopra i 5500°K con 150°K.

Le temperature di colore di alcune sorgenti di luce sono:

Luce di una candela (<i>candle</i>)		2000 K
Luce del sole all'alba (<i>sunlight at dawn</i>)		2000 K
Lampada domestica ad incandescenza (<i>tungsten bulb</i>) da 60 W		2760 K
Lampade alogene al tungsteno (<i>tungsten-halogen bulb</i>)		3200 K
Lampada Photoflood da 500 W per uso fotografico		3400 K
Lampada fluorescente (<i>fluorescent</i>)		4200 K
Sole al mattino e al pomeriggio (<i>morning-afternoon sun</i>)		4400 K
Luce solare a mezzogiorno (<i>midday sun</i>)		5500 K
Lampade HMI		5600-6500 K
Luce del cielo nuvoloso (<i>cloudy sky</i>)		7000 K

Figura 14 Temperatura colore di alcune sorgenti luminose

4.6 LAMPADINE LED: LUCE CALDA E LUCE FREDDA



Figura 15 Rappresentazione luce calda, luce neutra e luce fredda.

A seconda della temperatura delle lampadine utilizzate, infatti, ci troveremo di fronte a scenari diversi, che verranno percepiti dai nostri occhi come più o meno caldi, o freddi, dal punto di vista delle sfumature della luce.

Una **temperatura di colore bassa**, inferiore ai 3300° Kelvin corrisponde ad una luce calda, con sfumature che possono variare dal rossiccio, all'arancione, al giallo, fino al bianco caldo. Per quanto riguarda la luce calda, si prendono solitamente in considerazione valori compresi tra 0° e 3300° Kelvin. Alla temperatura di 3000° Kelvin viene fatta corrispondere la vera luce calda. A 3550° Kelvin avremo una luce più bianca, ma ancora calda.

Parliamo di luce fredda nel caso di lampadine dalla temperatura colore compresa tra i 3600 e i 6500 gradi Kelvin. In questo caso ci troveremo di fronte ad una luce particolare, tendente maggiormente al bianco e al bluastro. Le sfumature blu e azzurre conferiranno alla luce una tonalità fredda. È interessante sapere che il colore freddo, associato al ghiaccio puro, corrisponde ad una temperatura di 5000° Kelvin. Ai 6500° K viene associata una luce bianca bluastra. A volte, ad alte temperature, si parla anche di luce diurna (daylight).

In generale, per quanto riguarda le lampadine a luce bianca, **viene indicata la seguente suddivisione, che segue la convenzione UNI 12464:**

- 1) **Luce bianca calda:** se la temperatura di colore è minore di 3300° Kelvin.
- 2) **Luce bianca neutra:** se la temperatura di colore è tra i 3300 e i 5300° Kelvin.
- 3) **Luce bianca fredda:** se la temperatura di colore è superiore ai 5300° Kelvin.

Di norma, la luce bianca calda (con temperatura colore tra i 3000 e i 3500 gradi Kelvin) viene utilizzata per gli interni degli uffici o delle abitazioni. La luce bianca fredda, dai 4000 gradi Kelvin in su, viene preferita per i grandi spazi aperti al pubblico, ad esempio i supermercati. È importante ricordare che, se la gradazione della luce tende verso i toni del rosso (e verso temperature minori) parleremo di luce calda (o warm), mentre con temperature più elevate e tendenza ai toni del blu parleremo di luce fredda (o cool).

Non esiste una regola generale per quanto riguarda la scelta della temperatura di colore delle lampadine. Ognuno può basarsi sulle proprie preferenze e sulle esigenze di illuminazione del luogo in cui le lampadine verranno installate. L'impatto della tonalità della luce è soprattutto psicologico.

Siamo abituati ad associare la luce calda a sensazioni positive e alla comodità. Ecco perché la maggior parte delle persone preferisce acquistare lampadine a luce calda per la propria abitazione o per l'ufficio. Nei luoghi pubblici, dove ciò che conta di più sono l'efficienza e la definizione dei dettagli, troveremo per lo più luce fredda. Pensiamo, ad esempio, agli ospedali, agli ambulatori, agli studi dentistici e alle varie sale di attesa.

La luce calda viene percepita come morbida e avvolgente, quella fredda come dura e tagliente.

Difficilmente sceglieremmo la luce fredda per il salotto o per la stanza degli ospiti, mentre potremmo preferirla per lo studio o per le stanze da bagno. Alla luce fredda vengono associate sensazioni di maggiore ordine e pulizia. Le preferenze possono comunque variare in base agli ambienti ed alle persone che li abitano.

4.7 LA LUCE BLU

La luce blu rappresenta una particolare forma di radiazione elettromagnetica dello spettro del visibile a corta lunghezza d'onda compresa tra i 380-500 nm. La luce blu è benefica e nociva allo stesso tempo.

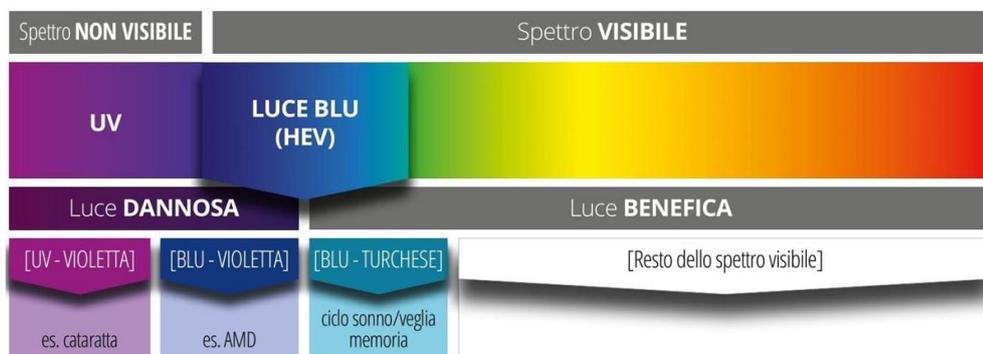


Figura 16 Luce blu nociva e luce blu benefica

- In particolare la luce "blu-viola" è nociva per le cellule della retina e può causare danni a lungo termine accelerando l'insorgenza della degenerazione maculare legata all'età. Nello spettro della luce, troviamo anche la luce "blu-turchese", considerata invece d'importanza vitale per l'organismo perché stimola la parte del cervello dove è prodotta la melatonina responsabile della regolazione del ciclo sonno-veglia. La luce blu è naturalmente presente nella luce del giorno e ci aiuta a rimanere svegli, però essa è anche emessa artificialmente dalla maggior parte dei dispositivi digitali, luci a led e alcune lampade a risparmio energetico. Le vecchie lampade a tungsteno contenevano il 3% di luce blu a differenza delle nuove che ne contengono il 33-35%.

Vediamo la percentuale di luce blu emessa dalle sorgenti:

- radiazione solare 25-30%;
- lampadine a risparmio energetico e lampade a fluorescenza 26% con picco a circa 435 nm ;
- diodi emettitori di luce bianca fredda (LED) 35% con picco a circa 400nm;
- lampade ad incandescenza 3%.

Abbiamo bisogno di una protezione dalla luce blu sia negli ambienti interni sia in quelli esterni. La sovraesposizione può causare affaticamento degli occhi, disturbi nella visione e insonnia, soprattutto quando sottoponiamo i nostri occhi a tale radiazione durante la notte. Il danno della luce blu è un danno da accumulo nel tempo e quindi i suoi effetti non sono immediatamente visibili. A complicare ulteriormente lo scenario si aggiunge il fatto che lo spettro di esposizione è dinamico, variando considerevolmente in base all'età, agli ambienti personali e professionali, di conseguenza esiste un profilo di rischio personalizzato per ogni individuo. E' scientificamente provato, che essa sopprime la produzione di melatonina, un ormone prodotto dalla ghiandola pineale, che regola il ritmo sonno-veglia e il nostro orologio interno, stimolando invece l'ipotalamo a diffondere nel corpo le orexine, proteine che generano l'attenzione e ci tengono svegli. Il ciclo circadiano, ciclo di 24 ore in cui si svolgono i ritmi fisiologici, è sballato perché il buio, che predispone il nostro corpo a seguire la fase naturale del riposo, è sostituito da una luce molto simile a quella del mattino e quindi è interpretata come un segnale di attenzione e di veglia.

La luce blu in realtà è divisa in:

- viola da 400 a 425 nm;
- indaco da 425 a 486 nm;
- blu da 486 a 493 nm.

L'indaco è la parte più importante su cui lavorano le aziende per limitare i danni. E' in corso un acceso dibattito sugli effetti benefici e su quelli nocivi della luce blu. L'attenzione dei ricercatori, in questo periodo, si concentra sulla parte blu dello spettro che può avere effetti dannosissimi sull'occhio umano o, al contrario, un effetto positivo sulla salute. Benché generalmente vi sia consenso sul fatto che esistono prove precliniche evidenti, sia a livello molecolare sia funzionale, che collegano la luce blu-viola alla tossicità oculare, ciò deve ancora essere dimostrato a livello clinico. La luce blu contiene energia da 3,26 a 2,52 eV e a causa della sua bassa lunghezza d'onda si diffonde maggiormente nell'occhio generando una diminuzione del contrasto, abbagliamento e una mancanza di focalizzazione che costringe l'occhio a una continua messa a fuoco per mantenere la visione nitida con conseguente affaticamento visivo. La banda del danno fototossico maggiore va da 415 a 455 nm con un massimo di 435 nm, poi abbiamo una banda cronobiologica da 465 a 495 nm essenziale per i ritmi circadiani: sonno-veglia, riflesso pupillare, ciclo ormonale, prestazioni cognitive, umore ecc. Oggi c'è maggiore interesse alla luce blu e questo è dovuto all'effetto serra, al buco dell'ozono di cui spesso parliamo e pochi fanno qualcosa, prima l'ozono e

l'atmosfera stessa ci proteggevano dai raggi UV e con le modifiche climatiche stiamo subendo un tipo di radiazione che prima non subivamo.

Se la radiazione è compresa tra i 465-495 nm, è definita "luce blu buona", al di sotto di tali lunghezze è definita "cattiva". Secondo alcuni studi scientifici, la luce blu è fondamentale per la vista e per il benessere generale dell'organismo, regola alcuni meccanismi come il riflesso pupillare (che attraverso la sua costrizione, rappresenta la nostra protezione naturale contro l'eccesso di esposizione alla Luce), il ritmo sonno-veglia, l'umore e la percezione naturale dei colori.

La luce blu è una radiazione che noi vediamo poiché fa parte dello spettro del visibile e quindi arriva a livello retinico, invece la radiazione ultravioletta non fa parte dello spettro del visibile, non arriva alla retina è filtrata dalle varie strutture, ma è sicuramente più dannosa perché ha un contenuto di energia più alto e può creare danni alle strutture interessate. La luce blu solare, di cui pochi ne parlano, è causa non indifferente nel determinare dei danni d'accumulo nel tempo, che si presentano soprattutto a livello retinico e vitreale, il danno percettivo non è immediato come può essere con i raggi ultravioletti. Nel vitreo abbiamo miodesopsie cioè dei corpi mobili che non creano danni, ma sono fastidiosissimi mentre nella retina queste radiazioni possono provocare reazioni fototossiche. La luce è fondamentale nella vita di tutti i giorni perché essa è collegata: all'acuità visiva, alla percezione dei colori, al riflesso pupillare e al controllo delle funzioni non visuali cioè il ritmo sonno-veglia. I raggi ultravioletti opacizzano il cristallino e possono causare la cataratta curabile con l'intervento chirurgico, la luce blu invece può danneggiare le cellule della retina e contribuire alla degenerazione maculare e non esiste trattamento efficace.

4.8 CRITERI PER UNA BUONA ILLUMINAZIONE

Ogni area di visione richiede un certo *illuminamento*. Il livello di illuminamento è associato al dettaglio dell'oggetto osservato e alla velocità di percezione richiesta. Un aumento dell'illuminamento può essere causa dell'aumento dell'attenzione e, di conseguenza, della necessità di sospendere l'attività con maggiore frequenza.

Le sorgenti all'interno del campo visivo non devono superare i 3000/2000 nit e, in generale si evita di includere la sorgente nel campo visivo.

La **sorgente illuminante** va posta al lato opposto rispetto alla dominanza del soggetto, ad esempio, a sinistra nel caso di una scrivania, in modo tale che la mano destra non proietti la sua ombra sulla scrittura.

In genere è sconsigliato un elevato illuminamento sul piano di lavoro, ma molto scarso nell'ambiente.

L'**illuminazione diffusa** è dannosa per lo svolgimento di attività visive notevoli, in quanto causa un abbassamento del contrasto, della visibilità e un aumento della difficoltà percettiva di profondità.

Un altro fattore importante da non sottovalutare è l'*equilibrio cromatico*. Quando l'apporto illuminante è misto artificiale e naturale, è importante considerare gli slittamenti cromatici soprattutto per attività che

richiedono fedeltà alla percezione cromatica. Infatti, all'aumentare della temperatura colore aumenta anche la visibilità e l'attenzione visiva (che può provocare maggiore stancabilità).

CAPITOLO 5- Esecuzione del test

5.1 LO SCOPO

Valutare l'entità massima di accomodazione che può essere ancora esercitata durante la visione prossimale (quanta addizione negativa si può introdurre fino a che il soggetto veda annebbiato perchè non è più in grado di produrre accomodazione).

A differenza dell'ampiezza accomodativa che fornisce il valore assoluto della capacità di messa a fuoco dell'esaminato, noi abbiamo esaminato quello relativo alla distanza di esecuzione.

5.2 I MEZZI

- **Luce ambientale spenta**
- **Mira** costituita da un brano di acutezza visiva 10/10 posto ad una distanza di 40cm.
- **Lenti di partenza**, sono quelle di una correzione tale da consentire la visione nitida di quanto proposto (correzione da lontano).
- **Distanza centri ottici** è uguale alla D.I.V e il forottero è in posizione di convergenza.
- **Monoculare** per evitare che il risultato sia influenzato dalla convergenza (rompere il legame convergenza-accomodazione).

5.3 ESECUZIONE

- 1) Si avvisa l'esaminato che si procederà all'introduzione successiva di lenti negative e che dovrà provvedere a mantenere nitide le parole mentre continuerà a leggerle ad alta voce fino a percepire l'annebbiamento totale e la lettura sarà impossibile.
- 2) Si iniziano ad introdurre lenti negative con step di 0,25D, in modo da stimolare l'accomodazione.
- 3) Procedendo con velocità sempre minore, anche in funzione della facilità di risposta del soggetto, si continua con l'introduzione di negativo (o rimozione di positivo secondo la lente di partenza) sino alla prima lente che comporta un leggero annebbiamento.
- 4) Si chiede all'esaminato se riesce, sforzandosi, a riportare la nitidezza: se la risposta è positiva si inseriscono altre 0,25D ripetendo ogni volta la domanda, mentre se è negativa si memorizza il valore raggiunto, che rappresenta il limite della capacità accomodativa.
- 5) Si riprende ad inserire lenti negative fino alla prima lente che fornisce un totale annebbiamento delle lettere e si memorizza.

6) Si annotano le differenze, in negativo, tra il valore raggiunto e quello di partenza.

5.4 NOTE

È necessario essere certi che l'esaminato indichi esattamente la prima lente che non gli consente di mantenere con sforzo la nitidezza; per questo motivo è bene chiedere continuamente conferme a riguardo della qualità dell'immagine e, in caso di risposta negativa, della possibilità di eliminare il leggero annebbiamento: "Legge senza difficoltà?", "Le lettere sono sempre nitide?", "Se si sforza riesce a tornare a vederle nitide?".

* Individuare la prima lente del totale annebbiamento è più semplice perché coincide col termine della possibilità di leggere da parte del soggetto.

Il test è stato eseguito in assenza di luce ambientale, l'unica sorgente di luce di cui ogni soggetto disponeva è stata una lampadina di uso comune posta ad una certa distanza dal soggetto in modo da evitare eventuale abbagliamento e, ad una certa distanza dal target per non incorrere in formazioni di ombre.

L'esperimento è stato ripetuto, per ogni soggetto, quattro volte, una per ogni lampadina di diversa temperatura colore utilizzata e rispettando, ogni volta, quanto espresso precedentemente avendo cura, in particolare, di collocare la sorgente luminosa sempre nella stessa posizione.

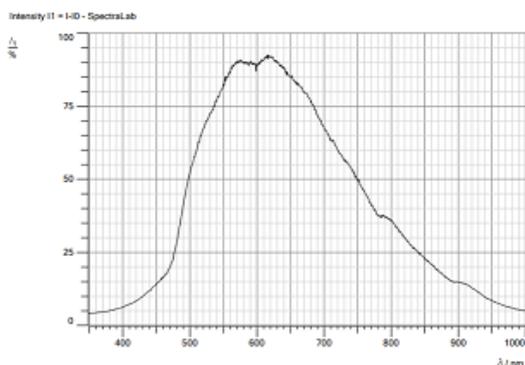
5.5 LAMPADINE UTILIZZATE

Prima di sottoporre i soggetti all'esperimento è stata effettuata una misurazione dello spettro elettromagnetico delle lampadine utilizzate con un fotometro.

Il fotometro è un dispositivo per misurare l'intensità luminosa, che può determinare l'intensità come funzione della lunghezza d'onda della radiazione luminosa.

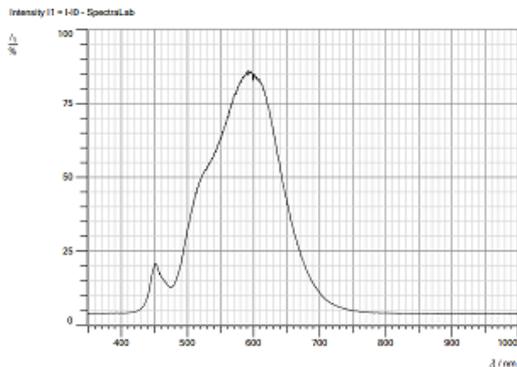
Sono state impiegate quattro lampadine di uso comune, che è possibile trovare in abitazioni, supermercati o per strada, che differiscono tra loro per temperatura colore.

Classifichiamo le lampadine in:



Temperatura colore 2800°K (lampada alogena)
Produzione Italiana
Sorgente luminosa calda, tendente all'arancione
Picco d'intensità a circa 600 nm.

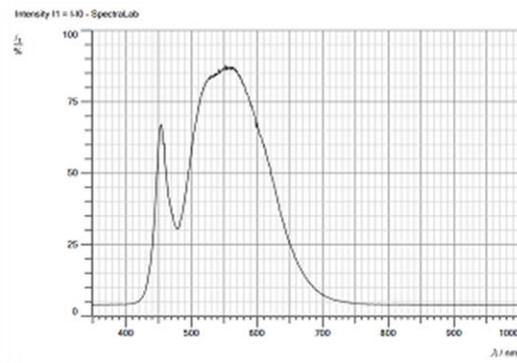
Figura 17 Intensità lampada con temperatura colore 2800°K



Temperatura colore 3000°K (lampada a led)
Produzione Italiana
Sorgente luminosa calda, tendente al giallo
Picco d'intensità a circa 600nm.

Temperatura colore 3000K

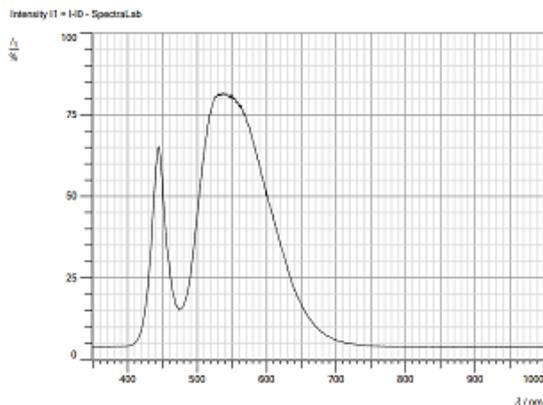
Figura 18 Intensità lampada con temperatura colore 3000°K



Temperatura colore 6000°K (lampada a led)
Produzione Italiana
Sorgente luminosa neutra, tendente al
bianco-azzurro.
Picco d'intensità a circa 550 nm

Temperatura colore 6000K

Figura 19 Intensità lampada con temperatura colore 6000°K



Temperatura colore 6000°Kc (lampada a led)
Produzione Cinese
Sorgente luminosa neutra, tendente al
bianco-azzurro
Picco d'intensità a circa 550 nm.

temperatura colore 6000Kc

Figura 20 Intensità lampada con temperatura colore 6000°K

Tutte le lampadine hanno un picco di intensità, in funzione della lunghezza d'onda della radiazione luminosa, a circa 600 nm per le sorgenti luminose "calde" e a circa 550 nm per le sorgenti luminose "neutre", nella regione dello spettro visibile, indipendentemente dalla temperatura colore. E' da notare l'andamento simile dell'intensità tra le due lampade di 6000K che differiscono per produzione: italiana, la prima, e cinese, la seconda.

La lampadina di produzione cinese, inoltre, è una lampadina a barre: è costituita da sei barre su ognuna delle quali sono saldati sei led.

I produttori di tecnologie per illuminazione LED si differenziano per il livello della qualità dei prodotti utilizzati; la differenza nella qualità delle componenti si riflette inevitabilmente in una performance differente a livello di stabilità, di durata e di qualità del prodotto finale; un esempio può essere fornito dalla qualità del diodo utilizzato per la costruzione del prodotto finito.

Un diodo di fascia bassa non potrà mai avere la medesima resa, sia in termini di illuminazione che di durata, rispetto ad un diodo di alta qualità.

La maggior parte dei soggetti che si sono prestati all'esperimento hanno avvertito fin da subito una notevole differenza tra le due lampadine di 6000°K, chi ha lamentato una minore intensità della luce, chi una minore chiarezza delle lettere, un minor contrasto, chi addirittura ha accusato un fastidio con l'utilizzo della lampadina di produzione cinese che è sicuramente, da quanto emerso, meno confortevole della lampadina di produzione italiana.

5.6 DATI SPERIMENTALI

Di seguito sarà riportata la tabella contenente i risultati dell'indagine effettuata :

Età	Temperatura colore	Accomodazione	Acc.+ dist. Lettura
20	2800°K	7,75 D	9,25 D
	3000°K	7,00 D	9,50 D
	6000°K	7,50 D	10,00 D
	6000°Kc	7,50 D	10,00 D
20	2800°K	6,50 D	9,00 D
	3000°K	6,75 D	9,25 D
	6000°K	7,00 D	9,50 D
	6000°Kc	7,25 D	9,75 D
20	2800°K	6,00 D	8,50 D
	3000°K	6,00 D	8,50 D
	6000°K	6,75 D	9,25 D
	6000°Kc	6,75 D	9,25 D
20	2800°K	7,75 D	10,25 D
	3000°K	8,25 D	10,75 D
	6000°K	8,75 D	11,25 D
	6000°Kc	8,50 D	11,00 D
20	2800°K	8,00 D	10,50 D
	3000°K	8,00 D	10,50 D
	6000°k	8,75 D	11,25 D
	6000°Kc	8,50 D	11,00 D
20	2800°K	6,00 D	8,50 D
	3000°K	6,00 D	8,50 D
	6000°k	7,75 D	9,25 D
	6000°Kc	7,75 D	9,25 D
21	2800°K	6,00 D	8,50 D
	3000°K	6,00 D	8,50 D
	6000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°Kc	6,25 D	8,75 D
21	2800°K	6,25 D	8,75 D
	3000°K	6,50 D	9,00 D
	6000°K	7,00 D	9,50 D
	6000°Kc	7,00 D	9,50 D
21	2800°K	9,00 D	11,50 D
	3000°K	8,75 D	11,25 D
	6000°K	9,00 D	11,50 D
	6000°Kc	9,00 D	11,50 D
21	2800°K	6,25 D	8,75 D
	3000°K	6,50 D	9,00 D
	6000°K	7,00 D	9,50 D
	6000°Kc	6,50 D	9,00 D
21	2800°K	7,25 D	9,00 D
	3000°K	7,50 D	9,25 D
	6000°K	7,75 D	9,50 D
	6000°Kc	7,75 D	9,50 D
21	2800°K	6,00 D	8,50 D
	3000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°K	6,50 D	9,00 D
	6000°K	6,50 D	9,00 D
22	2800°K	6,00 D	8,50 D
	3000°K	6,00 D	8,50 D
	6000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°Kc	5,75 D	8,25 D
22	2800°K	8,00 D	10,50 D
	3000°K	8,00D	10,50 D
	6000°K	8,75 D	11,25 D
	6000°Kc	8,50 D	11,00 D

Età	Temperatura colore	Accomodazione	Acc.+dist.Lettura
22	2800°K	6,25 D	8,75 D
	3000°K	6,50 D	9,00 D
	6000°K	6,75 D	9,25 D
	6000°Kc	7,00 D	9,50 D
22	2800°K	6,00 D	8,50 D
	3000°K	6,00 D	8,50 D
	6000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°Kc	6,75 D	9,25 D
22	2800°K	6,00 D	8,50 D
	3000°K	6,00 D	8,50 D
	6000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°Kc	6,25 D	8,75 D
23	2800°K	6,25 D	8,75 D
	3000°K	6,50 D	9,00 D
	6000°K	6,75 D	9,25 D
	6000°Kc	7,00 D	9,50 D
23	2800°K	6,00 D	8,50 D
	3000°K	6,00 D	8,50 D
	6000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°Kc	6,25 D	8,75 D
23	2800°K	6,25 D	8,75 D
	3000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°K	6,50 D	9,00 D
	6000°Kc	6,75 D	9,25 D
24	2800°K	6,00 D	8,50 D
	3000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°K	6,50 D	9,00 D
	6000°Kc	6,50 D	9,00 D
24	2800°K	6,25 D	8,75 D
	3000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°K	6,75 D	9,25 D
	6000°Kc	6,50 D	9,00 D
24	2800°K	5,75 D	8,25 D
	3000°K	5,75 D	8,25 D
	6000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°Kc	6,25 D	8,75 D
25	2800°K	5,50 D	8,00 D
	3000°K	5,75 D	8,25 D
	6000°K	6,25 D	8,75 D
	6000°Kc	6,00 D	8,50 D
25	2800°K	5,25 D	7,75 D
	3000°K	5,25 D	7,75 D
	6000°K	6,00 D	8,50 D
	6000°Kc	6,00 D	8,50 D
26	2800°K	5,50 D	8,00 D
	3000°K	5,50 D	8,00 D
	6000°K	5,75 D	8,25 D
	6000°Kc	5,75 D	8,25 D
26	2800°K	5,25 D	7,75 D
	3000°K	5,50 D	8,00 D
	6000°K	5,75 D	8,25 D
	6000°Kc	5,75 D	8,25 D
26	2800°K	6,25 D	8,75 D
	3000°K	6,50 D	9,00 D
	6000°K	7,00 D	9,50 D
	6000°Kc	6,50 D	9,00 D

Figura 21 Tabella riportante i valori ottenuti dall'indagine effettuata

Nella prima colonna della tabella è stata indicata l'età di ogni soggetto, a seguire la temperatura colore delle quattro lampade utilizzate e di conseguenza i valori riscontrati dalle misurazioni effettuate.

Poiché si sta valutando l'entità dell'accomodazione esercitata a distanza prossimale bisogna tener conto della distanza di lettura, ossia quella del target posto a 40 cm dal soggetto, per tanto è necessario aggiungere al valore di accomodazione trovato 2,50 D corrispondente all'inverso della distanza espressa in metri (1/0,40 m). Nell'ultima colonna della tabella sono riportati i valori inerenti all'accomodazione trovata più la distanza di lavoro e, sono i valori a cui si è fatto riferimento.

A circa metà dell'ottocento, attraverso calcoli empirici, si riuscì a determinare di quante diottrie un soggetto riesce ad accomodare in base all'età, con una formula matematica:

$$\text{AMPIEZZA ACCOMODATIVA} = 15 - \text{età} : 4$$

L'indagine è stata eseguita su soggetti giovani, di età compresa tra i 20 e i 26 anni. In base alla formula sopra espressa, la loro ampiezza accomodativa in funzione dell'età dovrebbe essere :

Età	Ampiez.Acc.
20	10,00 D
21	9,75 D
22	9,50 D
23	9,25 D
24	9,00 D
25	8,75 D
26	8,50 D

Confrontando i dati ricavati dall'esperimento con quelli relativi all'accomodazione che un soggetto dovrebbe avere ad una determinata età si riscontra una notevole somiglianza: i soggetti esaminati presentano un'accomodazione che varia mediamente dalle 8,50 D alle 10,00 D e, quindi valori conformi alla loro età.

E' stato, successivamente, studiato il comportamento dell'accomodazione al variare della temperatura colore delle sorgenti luminose.

Figura 22 Tabella relativa ai valori dell'accomodazione in base all'età

Saranno riportati di seguito quattro grafici che descrivono l'andamento dell'accomodazione per ognuna delle lampadine utilizzate :

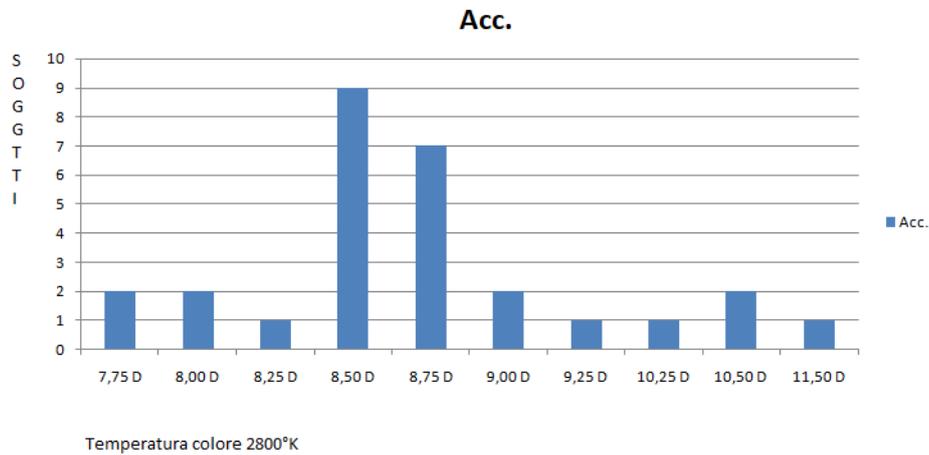


Figura 23 Valori di accomodazione ottenuti con lampada di 2800°K

Il grafico rappresenta un istogramma che descrive l'andamento dell'accomodazione a temperatura colore costante, 2800°K; sull'asse delle ascisse sono riportati i valori dell'accomodazione in diottrie, mentre, l'asse delle ordinate rappresenta il numero di soggetti che si sono prestati all'indagine.

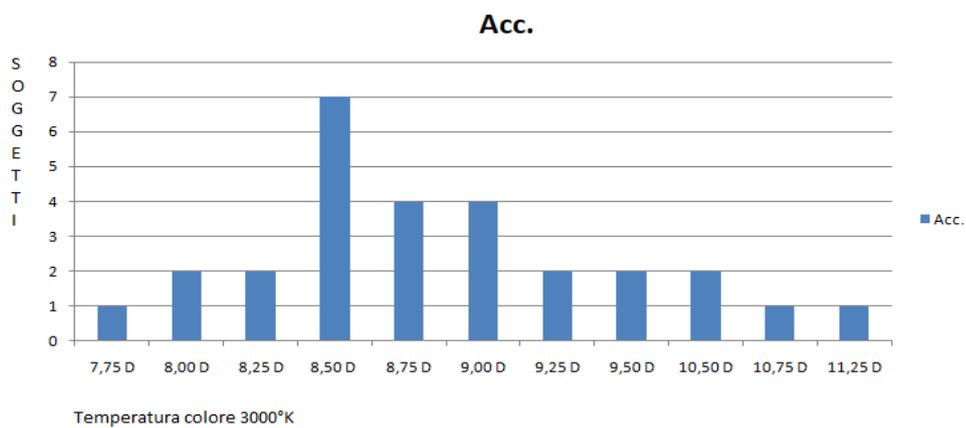


Figura 24 Valori di accomodazione ottenuti con lampada di 3000°K

Il secondo istogramma descrive il comportamento dell'accomodazione, sempre negli stessi soggetti, ma con una lampada di temperatura colore di 3000°K.

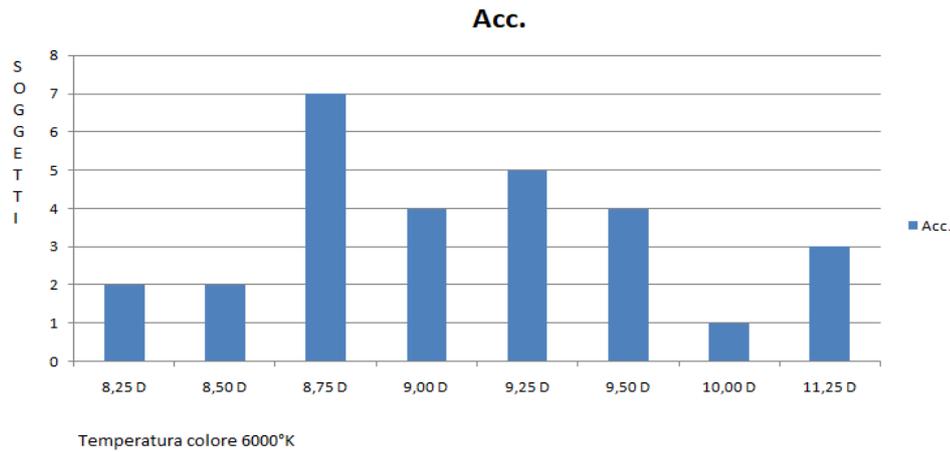


Figura 25 Valori di accomodazione ottenuti con lampada di 6000°K

La procedura per la realizzazione del terzo istogramma è sempre la medesima, cambia solo la temperatura colore, in questo caso di 6000°K, con una lampadina di produzione italiana.

Il successivo istogramma, invece, delinea l'andamento dell'accomodazione valutato con una lampadina di produzione cinese di 6000°K.

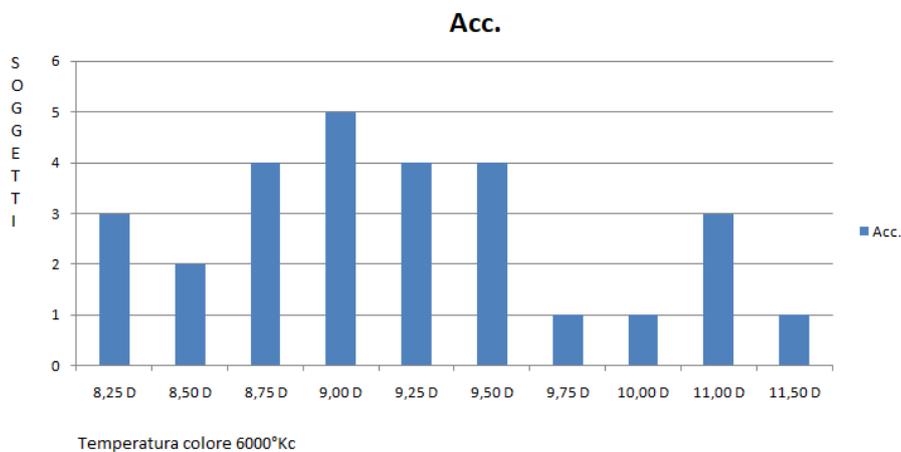


Figura 26 Valori accomodazione ottenuti con lampada 6000°Kc

Dai grafici ottenuti dall'indagine eseguita è subito evidente la differenza tra le sorgenti luminose "calde" e quelle "neutre".

Soffermandoci sui primi due grafici relativi alle lampadine con temperatura colore, rispettivamente, di 2800°K e 3000°K e, quindi abbastanza simili tra loro, si hanno valori di accomodazione compresi tra 7,75 D e 11,50 D, con un picco a 8,50 D.

I grafici che si riferiscono allo studio dell'accomodazione con lampadine di temperatura colore di 6000°K, di produzione italiana (terzo istogramma) e l'altra cinese (quarto istogramma), presentano valori che vanno da 8,25 D a 11,50 D, aventi un picco a 8,75 D/9,00 D.

Dallo studio svolto sulle possibili variazioni dell'accomodazione al variare della temperatura colore è emerso, che stimolando l'accomodazione con l'introduzione di lenti negative, con una sorgente luminosa "calda" si hanno valori minori di circa 0,50 D rispetto al una sorgente di luce "neutra", ossia si ha una minore capacità accomodativa.

L'esperimento è stato effettuato sempre sugli stessi soggetti ed è facile osservare le differenze già dalla tabella 1: la capacità accomodativa del medesimo soggetto varia al variare della temperatura colore della lampadina, anche se di pochissimo.

Confrontando i quattro grafici precedenti le differenze sono notevolmente percepibili :

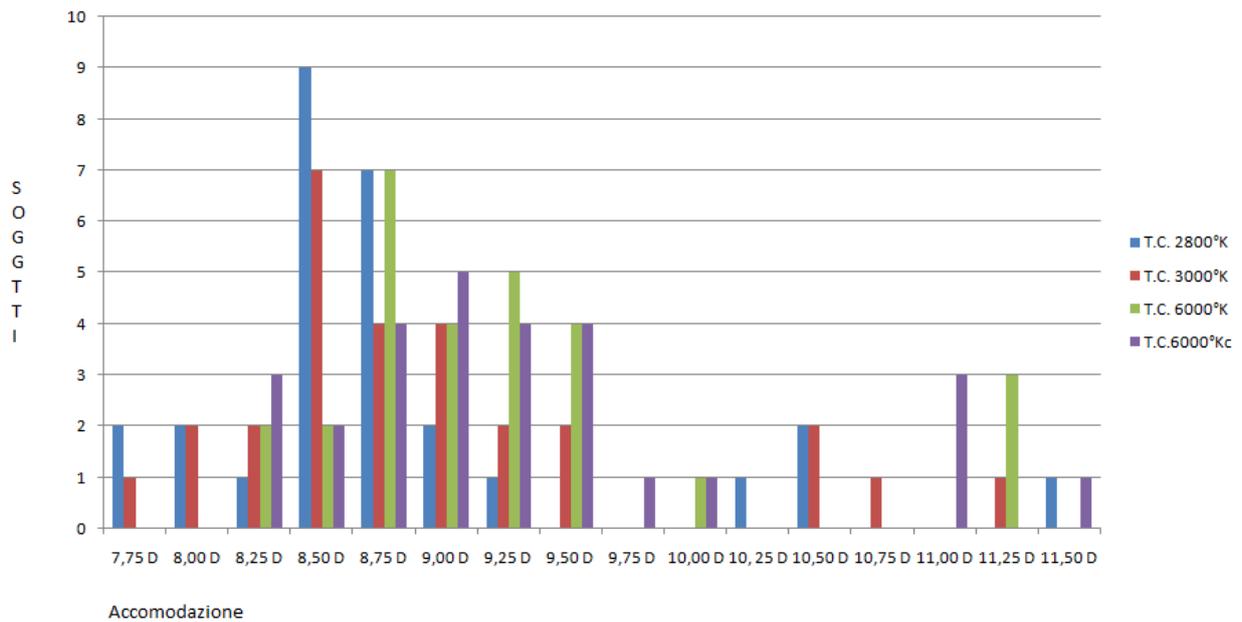


Figura 27 Confronto tra i valori di accomodazione ottenuti con le quattro lampade

La caduta della capacità accomodativa per le sorgenti di luce "calda" inizia da valori minori, da 7,75 D, mentre per le sorgenti luminose "neutre" parte da 8,25 D, si evidenzia un'escursione di 0,50 D di accomodazione tra i due tipi di lampadine utilizzate che si riversa anche sul picco di accomodazione, a 8,50 D per le temperature colore di 2800°K e 3000°K, a 8,75 D per la temperatura colore di 6000°K di produzione italiana e a 9,00 D per la temperatura colore di 6000°K di produzione cinese.

Tra i soggetti che si sono sottoposti all'esperimento ce ne sono due che non ho considerato in quanto presentavano una marcata insufficienza accomodativa che potrebbe essere dovuta ad un'alterazione dell'innervazione che regola l'attività del muscolo ciliare osservabile in condizioni di sovraffaticamento (stress, insufficiente riposo notturno o probabili malattie come il glaucoma, il diabete o assunzione di farmaci).

Conclusioni

In un mondo dominato dalla tecnologia LED, ormai criticata da tutti in quanto ritenuta pericolosa per la salute dell'occhio, ho voluto intraprendere questo studio per comprendere se questo tipo di illuminazione fosse davvero così pericolosa o se ne potessimo trarre dei vantaggi.

E' vero che oggi giorno fin da piccoli siamo esposti alla radiazione artificiale e che la dipendenza da ogni dispositivo elettronico, che emette luce LED, diventa sempre più incessante, motivo per cui i nostri occhi sono sottoposti ad affaticamento e sforzo, dovuti anche all'esagerata vicinanza di un cellulare, un videogioco o del televisore, ma da questo esperimento è emerso che la luce LED può avere anche dei vantaggi.

Si sa che la luce blu può essere "nociva", che può causare seri danni a livello retinico, ma vi è una parte della luce blu, tendente all'azzurro che è fondamentale per il nostro organismo.

Dall'esperimento eseguito le lampadine LED con temperatura colore di 6000°K che emettono luce bianca-azzurra risultano più gradevoli ai nostri occhi, sono quelle che inducono nei soggetti un minore sforzo accomodativo rispetto alle sorgenti luminose "calde", di conseguenza gli occhi non sono sottoposti ad affaticamento e stress, ma vivono in una condizione di rilassamento che si estende anche alla mente.

Per essere più sicura dei risultati ottenuti e averne conferma, ho provato a studiare per un mese in una stanza illuminata soltanto da luce "calda", facendo in modo che non ci fossero interferenze con altre sorgenti luminose e ho riscontrato difficoltà di resistenza: al termine della giornata avvertivo affaticamento e bruciore oculare, seguito a volte da lacrimazione ed emicrania. Il mese successivo ho studiato nelle medesime condizioni, questa volta con un'illuminazione bianca-azzurra e posso dire che è stato molto più rilassante e la sera non avvertivo alcun senso di spossatezza, anzi mi sentivo molto più serena, forse proprio per il fatto di esercitare un minore sforzo accomodativo.

In questa vita frenetica, fatta di corse e preoccupazioni avremmo bisogno tutti di sentirci bene e, perchè non iniziare dalla vista?

Il benessere visivo è fondamentale, vedere bene e senza sforzi ci rende più gioviali e ci fa sentire meno il peso dello stress soprattutto quando si lavora tutto il giorno, per questo il mio consiglio è di iniziare dal tipo di illuminazione, provando con lampadine aventi una temperatura colore di circa 6000°K e utilizzarle in ambienti di lavoro come uffici o supermercati, ma anche in abitazioni per sentirci meglio attraverso i nostri occhi.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- ❖ “Anatomia umana” III edizione,
- ❖ “Fisiologia” II edizione, Dee U. Silverthorn, 2013
- ❖ “Optometria A-Z, dizionario di scienze, tecnica e clinica della visione, L.Lupelli, 2014, Medical Books
- ❖ “Manuale di optometria e contattologia” II edizione, A. Rossetti e P. Gheller, 2003, Zanichelli
- ❖ Dispense corso tecniche fisiche per l’optometria, P. Carelli, Università Federico II
https://issuu.com/re_lighting/docs/blue_light_it_en
- ❖ “L’esame visivo efficace”, L. Giannelli-M. Giannelli-G. Moro, ed. Medical Books, 2012 –
- ❖ “Manuale pratico per l’esecuzione di un esame visivo”, A. Maiocchi, ed. Medical Books, 2007
- ❖ “The effects of accommodative deficiencies on the development level of perceptual skills”, L. Hoffman; Am J Optom Physiol; 1982
- ❖ “Patologia Testa-Collo”, G. Bonavolontà-L. Califano-G. Cennamo, ed. Idelson Gnocchi, 2011
- ❖ “Pratica della refrazione”, Abrams David
- ❖ “Fondamenti di Ottica della Visione”, Piccin., Catalano Ferdinando (2014)
- ❖ Fossetti Alessandro, Rossetti Anto, Zeri Fabrizio
- ❖ “Manuale di optometria e contattologia” Gheller Pietro, Rossetti Anto, seconda edizione.
- ❖ “Esame visivo efficace”, Gheller Pietro, Rossetti Anto Medical Books, 2012.
- ❖ “La verifica e la valutazione optometrica dell’attività visiva prossimale” Maffioletti Silvio,.
- ❖ “Manuale pratico per l’esecuzione di un esame visivo”, dal semplice controllo alla procedura dei 21 punti, Maffioletti Silvio
- ❖ “L’esame del visus” Paliaga Gian Paolo,.
- ❖ “I vizi di refrazione”, Paliaga Gian Paolo IV edizione. [6]
- ❖ <http://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2191954#88156176>
- ❖ https://issuu.com/marcofabiano/docs/supplemento_b2eyes_luce_blu_bassa

RINGRAZIAMENTI

Ho intrapreso questo percorso con un motto: "L'importante è portare a termine ciò che si inizia". Oggi posso dire di aver raggiunto il mio obiettivo. E' stato un periodo di profondo apprendimento, non solo a livello conoscitivo ma soprattutto a livello personale per avermi dato la possibilità di conoscere nuove persone.

Colgo l'occasione per ringraziare il prof. Salvatore Abys per aver sempre creduto in me, per l'incoraggiamento, per i consigli e in particolare per la sopportazione non solo per la preparazione della tesi, ma per tutto il percorso di studi fatto insieme. E' una persona da stimare, ma soprattutto da imitare per la passione per il suo lavoro e la voglia di trasmettere tutta la sua esperienza ai suoi studenti e prepararli al mondo lavorativo e far trovare loro la strada giusta per una crescita professionale, ma anche sociale e personale.

Ringrazio le amiche conosciute durante questo lungo percorso per essermi state vicine nei momenti di sconforto, per avermi dedicato il loro tempo, per avere gioito insieme e che occuperanno sempre un posto speciale nel mio cuore anche se lontane, Chiara e Marianna.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia: a mio padre, Salvatore, per avermi sempre lasciata libera di prendere le mie decisioni, per avermi sempre appoggiata e per essersi sempre fidato di me, cercherò di non deluderti mai; a mia mamma, Luisa, con la quale ogni giorno è una sfida, ma so che lo fa solo per proteggermi e aiutarmi a crescere; ai miei fratelli per essermi sempre vicini e pronti a difendermi, in particolare ringrazio il mio piccolo grande uomo Alessandro, per essermi stato di aiuto in questo percorso e che a volte ho costretto ad ascoltarmi o a trascrivere appunti.

Ringrazio in ultimo, e non per importanza, il mio fidanzato, Peppe, che ammiro per il coraggio e la forza con cui affronta le sue giornate, per supportarmi e sopportarmi. E' grazie a lui se sono giunta al mio traguardo, è stato lui ad incoraggiarmi fino alla fine perché ha sempre creduto in me.

Con affetto Paola.