

# Óptica Instrumental

Fernando S. Buezas

27 de agosto de 2017

# Índice general

<b>1. Sistemas Ópticos</b>	<b>3</b>
1.1. Sistemas ópticos centrados . . . . .	4
1.1.1. Objeto e imagen . . . . .	4
1.1.2. Espacio objeto y espacio imagen . . . . .	6
1.1.3. Puntos conjugados . . . . .	7
1.2. Sistema óptico perfecto . . . . .	7
1.3. Convenio de signos . . . . .	8
1.4. Planos principales objeto e imagen . . . . .	10
1.5. Plano focal imagen y objeto . . . . .	11
1.6. Sistemas positivos y negativos. Relación entre focales . . . . .	13
1.7. Óptica paraxial . . . . .	14
1.8. Ecuaciones de Correspondencia . . . . .	14
1.9. Aumento angular . . . . .	18
1.10. Puntos Nodales . . . . .	19
1.11. Trazado de rayos . . . . .	21

1.12. Condición de Abbe . . . . .	22
1.13. Sistemas Compuestos . . . . .	23
1.14. Las Aberraciones geométricas y cromáticas . . . . .	27
<b>2. Fotometría</b>	<b>36</b>
2.1. Eficacia luminosa . . . . .	37
2.2. Ángulo sólido . . . . .	37
2.3. Flujo luminoso . . . . .	40
2.4. Energía luminosa o cantidad de luz . . . . .	41
2.5. Intensidad luminosa . . . . .	42
2.6. Iluminancia . . . . .	43
2.7. Luminancia . . . . .	44
2.8. Leyes básicas de la fotometría . . . . .	45
2.9. Reflexión y transmisión . . . . .	48
<b>3. Aspectos generales de los Instrumentos</b>	<b>56</b>
3.1. Clasificación . . . . .	56
3.1.1. Instrumentos ópticos Objetivos . . . . .	57
3.1.2. Instrumentos ópticos subjetivos . . . . .	57
3.2. Parametros generales . . . . .	57
3.3. Aumento . . . . .	58
3.3.1. Claridad . . . . .	61
3.3.2. Campo . . . . .	61
3.3.3. Poder separador . . . . .	61

# Capítulo 1

## Sistemas Ópticos

Los instrumentos ópticos, formadores de imágenes, utilizan superficies talladas sobre cuerpos transparentes o espejados, generalmente de vidrio, con el objetivo de cambiar la dirección de los rayos luminosos. Normalmente se usan superficies planas o esféricas, pero también pueden aparecer superficies cilíndricas, elipsoidales, parabólicas, etc. Llamaremos sistema óptico al conjunto de estas superficies que modifican la dirección de propagación de la luz para formar una imagen en un plano que podría estar ubicado inmediatamente detrás del instrumento o en el infinito. Todo nuestro estudio acerca de las propiedades de estos sistemas será dentro del marco de la óptica geométrica (reflexión y refracción). En definitiva, un conjunto de superficies que separan medios de distinto índice de refracción constituyen un sistema óptico.

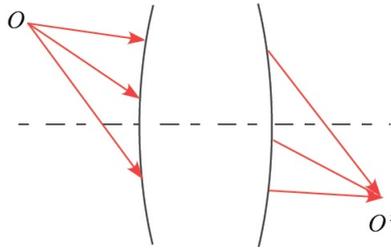


Figura 1.1: Objeto e imagen característico de un sistema óptico

## 1.1. Sistemas ópticos centrados

Si, como caso particular, estas superficies tienen sus centros en una recta, forman un *sistema óptico centrado*. La recta que une los centros de las superficies reflectoras o refractoras se denomina *eje del sistema óptico*.

### 1.1.1. Objeto e imagen

Si un punto  $O$  emite rayos de luz ante un sistema, y después de reflejarse o refractarse en las distintas superficies lo atraviesan y van a unirse en un punto  $O'$ , a este punto se lo denomina *imagen*, o punto imagen de  $O$ , y al punto  $O$ , punto *objeto*.

Si los rayos parten realmente de  $O$ , y se cortan realmente en  $O'$ , se dice que  $O$  es un *punto objeto real*, y  $O'$  un *punto imagen*

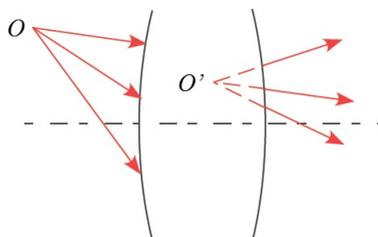


Figura 1.2: Sistemas ópticos divergentes

*real*, ver Figura 1.1

Puede ocurrir que los rayos sean divergentes después de atravesar el sistema, pero que sus prolongaciones se corten en sentido contrario al de propagación en un punto  $O'$ . A este punto se le denomina *imagen virtual* de  $O$ , ver Figura

Cuando se acoplan dos sistemas la imagen formada por el primero sirve de objeto para el segundo. Si hubiera más de dos sistemas acoplados, la imagen formada por cada sistema, sea real o virtual, sirve de objeto para el siguiente. Si como ocurre en el caso de la Figura 1.3, la imagen  $O'_1$  del punto objeto real  $O_1$  no llega a formarse, porque los rayos son desviados antes de cortarse, se dice que  $O'_1$  sirve como objeto virtual  $O_2$  para el segundo sistema. Un objeto virtual solamente puede darse en el caso de un acoplamiento entre dos sistemas como los de la Figura 1.3.

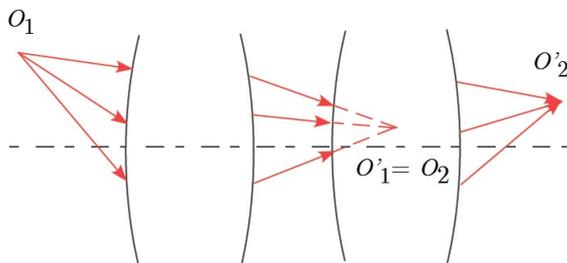


Figura 1.3: Sistemas ópticos compuestos

### 1.1.2. Espacio objeto y espacio imagen

Se considera como *espacio objeto* de un sistema todo el espacio geométrico en el que puede haber objetos, tanto reales, como virtuales. Y *espacio imagen*, el espacio geométrico en el que puede haber imágenes, tanto reales, como virtuales. Por consiguiente, todo el espacio es a la vez espacio objeto y espacio imagen. Suele interpretarse como espacio objeto la parte izquierda de un sistema, suponiendo que la luz se propaga de izquierda a derecha, aunque los objetos virtuales lo prolongan por la derecha, pero entendiendo siempre que aunque un objeto virtual quede a la derecha, o, aparentemente, dentro de un sistema, se considera sumergido en el medio de la izquierda. Otro tanto puede decirse del espacio imagen cambiando los términos izquierda y derecha.

### 1.1.3. Puntos conjugados

Si un punto  $O'$  es la imagen que forma un sistema óptico de un punto objeto  $O$ , se dice que  $O$  y  $O'$  son *puntos conjugados*. En general, de las figuras que son la una imagen de la otra, se dice que son *figuras conjugadas* respecto de un sistema óptico.

## 1.2. Sistema óptico perfecto

Se dice que un sistema óptico es perfecto para dos planos  $P$  y  $P'$ , perpendiculares al eje del sistema, cuando tienen las siguientes propiedades (conocidas como condiciones de Maxwell):

1. A un punto objeto le corresponde un punto imagen, de tal manera que todos los rayos que parten del punto objeto y atraviesan el sistema óptico pasan por el punto imagen a la salida del mismo. Esta condición se denomina condición de *estigmatismo*.
2. A un plano objeto perpendicular al eje óptico le corresponde un plano imagen también perpendicular al eje. Estos planos se denominan *planos conjugados*. Todo punto objeto contenido en el plano objeto tiene su correspondiente punto imagen contenido en el plano imagen.
3. A una figura contenida en el plano objeto le corresponde una figura imagen semejante, contenida en el plano imagen. La razón de la semejanza entre las figuras conjugadas es constante para el par de planos conjugados, y se denomina *aumento lateral*.

El aumento lateral se representa por la letra  $m$  y se define según la relación:

$$m = \frac{y'}{y} \quad (1.1)$$

donde por  $y'$  entendemos que es la dimensión *lineal* de la imagen de un objeto  $y$ . Cuando el aumento lateral es negativo, se dice que el sistema óptico *invierte* la imagen. Cuando el valor absoluto del aumento lateral es mayor que la unidad, entonces la imagen es mayor que el objeto; recíprocamente, un aumento lateral con valor absoluto menor que la unidad indica que la imagen es menor que el objeto.

### 1.3. Convenio de signos

Utilizaremos el siguiente convenio de signos y nomenclatura:

1. Para designar los elementos correspondientes a una imagen se utilizan las mismas letras que para el objeto pero con tilde.
2. Para las distancias medidas sobre el eje se considera como origen el vértice  $V$ , y se toma como sentido positivo el de la luz incidente, que, mientras no se indique lo contrario, se considerará que se propaga de izquierda a derecha. Por consiguiente, en la Figura 1.4 la distancia  $s$  es negativa, y la distancias  $s'$  es positiva.
3. Los segmentos normales al eje son positivos si están situados por encima del eje, y negativos en caso contrario.

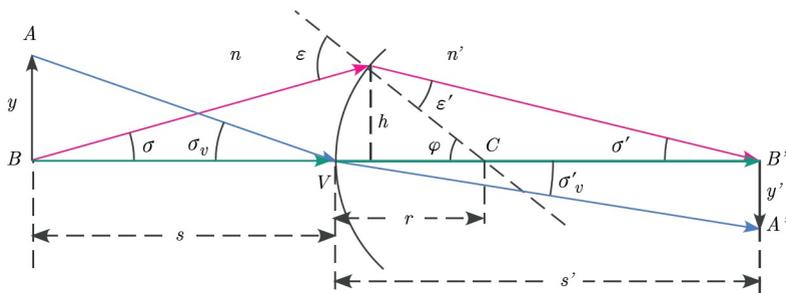


Figura 1.4: Convenio de signos y nomenclatura

4. Los ángulos de incidencia y refracción,  $\varepsilon$  y  $\varepsilon'$ , son positivos si, al llevar a coincidir los rayos con la normal, girándolos por el camino más corto, el sentido de giro es el de las agujas del reloj.
5. Los ángulos que forman los rayos con el eje son positivos si, al llevar a coincidir los rayos con el eje, girándolos por el camino más corto, el sentido de giro es contrario al de las agujas del reloj.

En la Figura 1.4:

Son magnitudes positivas:  $\sigma'$ ,  $r$ ,  $h$ ,  $y$ ,  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon'$ ,  $s'$  y el ángulo  $\varphi$ .

Son magnitudes negativas:  $y'$ ,  $s$ ,  $y$  y los ángulos  $\sigma_v$  y  $\sigma'_v$ , considerados como ángulos de incidencia y refracción.

Obsérvese que el ángulo  $\varphi$  es positivo, tanto si se considera formado por un rayo que incidiese en la dirección de la normal,

con el eje, como si se considera formado por un rayo que incide en la dirección del eje, con la normal. Con estos convenios, cuando se produce una reflexión sobre una superficie, los ángulos de incidencia y reflexión son de signos contrarios, por tanto, la ley de la reflexión en zona paraxial es

$$\varepsilon = -\varepsilon' \quad (1.2)$$

de modo que una reflexión se puede interpretar como una refracción en un medio de índice

$$n' = -n \quad (1.3)$$

## 1.4. Planos principales objeto e imagen

Se llama *planos principales* a un par de planos conjugados (objeto e imagen) perpendiculares al eje óptico, para los que el aumento lateral vale uno<sup>1</sup>.

El plano principal objeto  $H$  corta al eje óptico en el punto principal objeto. El plano principal imagen  $H'$  corta al eje óptico en el punto principal imagen.

De la definición de los planos principales se deduce que si un rayo corta el plano principal objeto a una altura  $y$ , dicho rayo sale del sistema óptico cortando al plano principal imagen a la misma altura  $y$  (Figura 1.5).

---

<sup>1</sup>Uno podría pensar que el aumento lateral en los planos principales es debido a la formación de una imagen, esto no es así, ya que en dicho par de planos el aumento es 1 y no -1

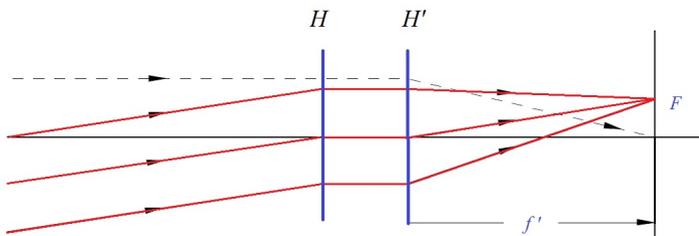


Figura 1.5: Planos principales

## 1.5. Plano focal imagen y objeto

Se llama *plano focal imagen* al plano donde se forman las imágenes de los objetos situados en el infinito. El punto de corte del plano focal imagen con el eje óptico se llama *foco imagen*, y se representa por  $F'$ . La distancia del punto principal imagen  $H'$  al foco imagen  $F'$  se llama *distancia focal imagen*, y se representa por  $f'$  ver Figura 1.5.

$$f' = \overline{H'F'} \quad (1.4)$$

De esta definición se deduce que:

1. Rayos paralelos entre sí (proviene de un punto del infinito), que inciden en un sistema óptico, salen del mismo plano pasando por un mismo punto del plano focal imagen (Figura 1.5).
2. Los rayos que entran al sistema paralelos al eje óptico van a salir pasando por el foco imagen (línea punteada en Figura

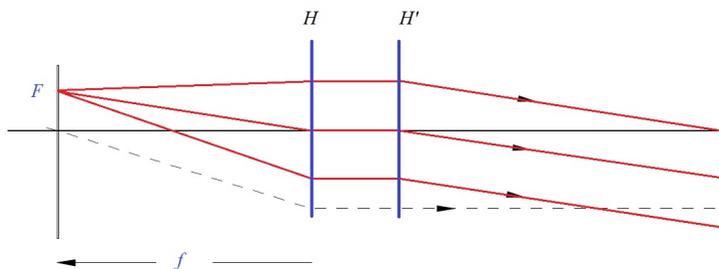


Figura 1.6: Plano focal objeto

1.5)

Se llama *plano focal objeto* al plano cuya imagen se forma en el infinito. El punto de corte con el eje óptico se denomina *foco objeto* y se representa por  $F$  ya que es el conjugado de  $F'$ . La focal objeto es la distancia representada por  $f$ , que se define como la distancia del punto principal objeto  $H$  al foco objeto  $F$ :

$$f = \overline{HF} \quad (1.5)$$

Cualquier haz de rayos que parte de un punto del plano focal objeto sale del sistema óptico formando un haz cilíndrico de rayos paralelos entre sí (ver Figura 1.6). El haz de rayos que parte del foco objeto sale del sistema paralelo al eje óptico. El aumento lateral será infinito en este caso.

Si se conoce la posición de los planos principales y de los focos de un sistema óptico, se pueden resolver todos los problemas que

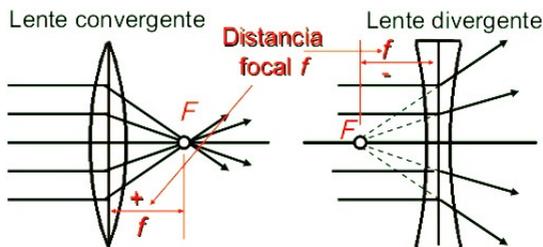


Figura 1.7: Sistemas positivos y negativos. La distancia focal  $f$  es positiva para focos convergentes y negativa para focos divergentes.

se pueden plantear en la Óptica paraxial, el conjunto de estas cantidades se denomina *puntos cardinales* de un sistema óptico.

## 1.6. Sistemas positivos y negativos. Relación entre focales

Un sistema óptico es *positivo* cuando la imagen se sitúa del lado derecho del plano principal imagen. Es decir, se dice que es positivo cuando la imagen lo es según nuestro convenio de signos. Por el contrario un sistema es *negativo* cuando la imagen esta del lado izquierdo.

Los sistemas positivos corresponden a imágenes reales, luego, los sistemas positivos son convergentes. Por el contrario los

sistemas negativos son divergentes. De la óptica geométrica se sabe que en los sistemas diópticos vale

$$-\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'} \quad (1.6)$$

donde  $f$  la focal objeto,  $f'$  la focal imagen,  $n$  el índice de refracción del espacio objeto y  $n'$  el índice de refracción del espacio imagen. La fórmula (1.6) se conoce como *Relación de Largange*.

## 1.7. Óptica paraxial

Muchas de las situaciones que se estudian en la Óptica Geométrica e instrumental presentan como particularidad que las trayectorias de los rayos de luz forman ángulos pequeños con el eje óptico. Típicamente se da en sistemas de poca apertura y largas focales. Cuando se trabaja en éstas condiciones se habla de Óptica de primer orden o bien *Óptica Paraxial*. En la aproximación paraxial de primer orden, el seno y la tangente de un ángulo se aproximan por el ángulo mismo (en radianes), y el coseno por 1 simplificando, por un lado el álgebra en el cálculo, y por el otro la manufactura de sistemas libres de aberraciones esféricas.

## 1.8. Ecuaciones de Correspondencia

Dado un sistema óptico del que se conocen sus planos principales y focales. Si se coloca un objeto  $OP$  perpendicular al eje

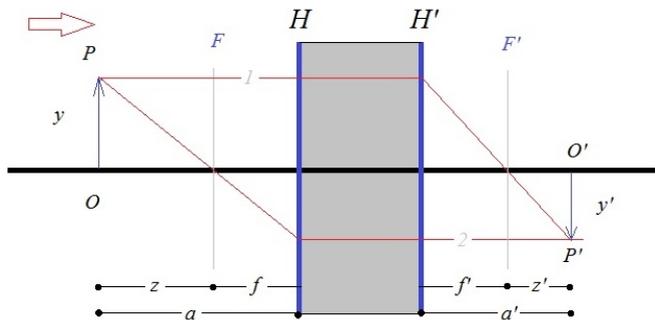


Figura 1.8: Trayectoria y trazado de rayos para el calculo de las ecuaciones de correspondencia

óptico, de altura  $y$ . Se trazan los rayos 1 y 2 desde  $P$  y se halla el punto  $P'$ , que será imagen de  $P$  a través del sistema; y, por tanto,  $O'$  será imagen de  $O$ .

En la Figura 1.8 se definen las distancias  $z$ ,  $z'$ ,  $a$  y  $a'$  referentes al objeto y a la imagen, que se miden desde los focos o desde los planos principales correspondientes, entonces:

$$a = \overline{HO} \tag{1.7}$$

$$a' = \overline{H'O'} \tag{1.8}$$

$$z = \overline{fO} \tag{1.9}$$

$$z' = \overline{f'O'} \tag{1.10}$$

A partir de las relaciones de semejanza existentes entre los

triángulos se obtiene que

$$\frac{y}{z} = \frac{y'}{f} \quad (1.11)$$

luego

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{f}{a-f} \quad (1.12)$$

por otro lado

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{z'}{f'} = -\frac{a' - f'}{f'} \quad (1.13)$$

es decir

$$-\frac{f}{a-f} = -\frac{a' - f'}{f'} \quad (1.14)$$

multiplicando por  $a - f$  y dividiendo por  $f$  a ambos miembros y desarrollando se llega a

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{(a' - f')(a - f)}{f'f} \\ &= \frac{a'a + f'f - a'f - af'}{f'f} \\ &= \frac{a'a}{f'f} + \frac{f'f}{f'f} - \frac{a'f}{f'f} - \frac{af'}{f'f} \\ 1 &= \frac{a'a}{f'f} - \frac{a'}{f'} - \frac{a}{f} \end{aligned}$$

por ultimo multiplicando todo por  $\frac{f'f}{a'a}$ , se demuestra que

$$\frac{f}{a} + \frac{f'}{a'} = 1 \quad (1.15)$$

Que a través de la relación (1.6) se encuentra la llamada fórmula de Descartes:

$$\frac{n'}{a'} - \frac{n}{a} = \frac{n'}{f'} \quad (1.16)$$

Recordando la ley de Snell (también llamada ley de Snell-Descartes), relación utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios

$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \quad (1.17)$$

y que en la aproximación paraxial ( $\theta \ll 1$ ) vale  $\sin \theta \approx \tan \theta = y/a$  se ve que el aumento lateral también se puede expresar como:

$$m = \frac{n a'}{n' a} \quad (1.18)$$

De (1.12) y (1.13) se deduce también:

$$zz' = ff' \quad (1.19)$$

conocida como relación de Newton. Estas relaciones conocidas como de *correspondencia* son muy útiles para calcular las posiciones y tamaños de imágenes dado los objetos y los puntos cardinales del sistema óptico.

Muchos de los sistemas ópticos, considerados en su conjunto, tienen los índices de los espacios objeto e imagen iguales,  $n = n'$ . En este caso las ecuaciones anteriores se reducen a:

1. De (1.6), Relación entre focales,  $f = -f'$

2. Formula de Descartes:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f} \quad (1.20)$$

3. Formula de Newton:

$$zz' = -f'^2 \quad (1.21)$$

4. Aumento lateral

$$m = \frac{a'}{a} \quad (1.22)$$

El signo se deberá sustituir en la fórmula correspondiente, aplicando las reglas de signos de álgebra. No se deben confundir las distancias  $a$  y  $a'$  con las distancias frontales, medidas desde la primera superficie al objeto, o desde la última superficie a la imagen.

## 1.9. Aumento angular

Se define el aumento angular al cociente entre el ángulo incidente (proyección del rayo incidente) y el ángulo emergente (rayo imagen) (Figura 1.9)

$$\gamma = \frac{\omega'}{\omega} \quad (1.23)$$

que se relaciona con el aumento lateral según:

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{n\omega}{n'\omega'} = \frac{n}{n'\gamma} \quad (1.24)$$



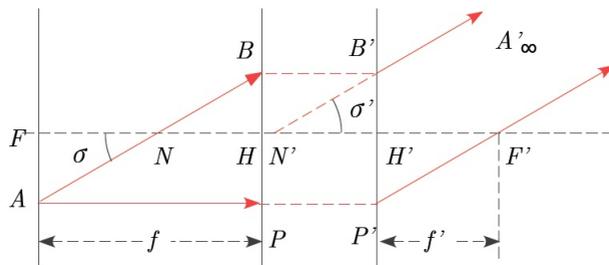


Figura 1.10: Trazado de rayos para individualizar los puntos nodales

por  $B'$  determinan los puntos nodales  $N$  y  $N'$ , ya que los ángulos  $\sigma$  y  $\sigma'$  son iguales. De la Figura 1.10 se deduce, por paralelismo e igualdad de triángulos, que:

$$NH = N'H' \quad NN' = HH' \quad FN = H'F' = f' \quad F'N' = FH = f \quad (1.25)$$

ya que, los triángulos  $NHB$  y  $N'H'B'$  son iguales, así como los triángulos  $AFN$  y  $P'H'F'$ .

De donde se deduce que: La distancia entre los puntos nodales es igual a la distancia entre los puntos principales. Y que En sistemas con índices extremos iguales los puntos nodales coinciden con los puntos principales. ya que,

$$FN = f' = -f \quad (1.26)$$

luego  $N$  coincide con  $H$ , y  $N'$  con  $H'$ , y en consecuencia, Todo rayo que se dirige hacia el punto principal objeto  $H$ , sale por el

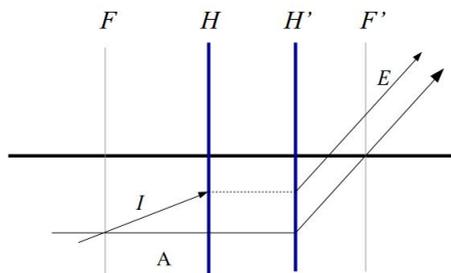


Figura 1.11: Trazado de rayos Método 1

punto principal imagen  $H'$  paralelamente al rayo incidente.

## 1.11. Trazado de rayos

Como ya se indicó, con ayuda de los elementos cardinales se puede hallar la posición y tamaño de la imagen conocidas la posición y tamaño del objeto. Para trazar la trayectoria de cualquier rayo incidente (pase este o no por algún punto cardinal) utilizaremos cualquiera de los siguientes métodos. Es decir se puede trazar el rayo emergente  $E$  correspondiente a un rayo incidente  $I$ .

Método 1. Se halla el punto de corte  $P$  del rayo incidente  $I$  con el plano focal objeto. Para dicho punto se traza un rayo auxiliar  $A$ , paralelo al eje, que sale por  $F'$  y que será paralelo al rayo emergente  $E$  (Figura 1.11).

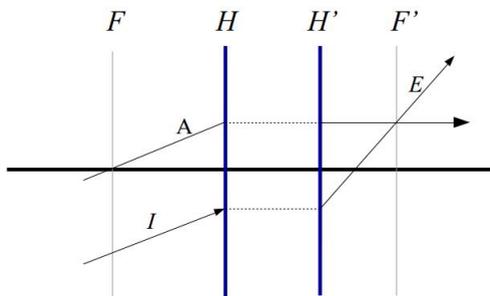


Figura 1.12: Trazado de rayos Método 2

Método 2. Análogo al anterior método Se halla el punto de corte  $P$  del rayo incidente  $I$  con el plano focal objeto. Para dicho punto se traza un rayo auxiliar  $A$ , ahora paralelo al rayo incidente y pasante por el eje en el punto focal objeto. El rayo auxiliar sale paralelo al eje óptico y cortará el plano focal imagen en un punto al que concurre el rayo emergente (Figura 1.12).

## 1.12. Condición de Abbe

La relación de senos de Abbe es una condición que deben cumplir las lentes u otros sistemas ópticos para poder producir imágenes definidas de objetos tanto en el eje óptico como fuera de él. Formulada por Ernst Abbe en el campo de los microscopios será útil para todo instrumento óptico formador de imágenes.

Volviendo a la figura 1.4 tenemos un casquete esférico de radio  $r$  y vértice  $V$  que separa dos medios de índices de refracción  $n$  y  $n'$ , siendo  $n' > n$ . Un punto luminoso  $B$  situado sobre el eje óptico emite un rayo hacia el sistema óptico. Este rayo forma un ángulo  $\sigma$  con el eje óptico y se refracta siguiendo el camino hasta su conjugado  $B'$  formando un ángulo  $\sigma'$  con el eje óptico imagen. Como  $n' > n$  el rayo refractado se aproxima a la normal y  $\sigma' < \sigma$  según

$$ny \sin \sigma = n'y' \sin \sigma' \quad (1.27)$$

### 1.13. Sistemas Compuestos

Supongamos que acoplamos dos sistemas (I) y (II), como muestra la Figura 1.13, de los que conocemos sus focos y puntos principales.

La distancia  $t = F'_1 F_2$ , denominada intervalo óptico, es la distancia de acoplamiento entre el foco imagen  $F'_1$  del sistema (I) y el foco objeto del sistema (II) medida en el sentido de  $F'_1$  hacia  $F_2$ . En la Figura 1.13  $t$  es positivo. Si los sistemas estuvieran más próximos de manera que  $F'_1$  quedara a la derecha de  $F_2$ ,  $t$  sería negativo. Supongamos que conocemos la posición de los focos  $F$  y  $F'$  del sistema total. Para hallar la posición del plano principal imagen del sistema total se traza un rayo  $r_1$ , paralelo al eje del sistema, a una altura  $h$ , tal como el que pasa por el punto  $A$ . Este rayo saldrá del sistema (I) pasando por el foco imagen,  $F'_1$ , y emergerá del sistema (II) pasando por el foco imagen  $F'$  del sistema total, puesto que ha entrado paralelo al eje del sistema total.

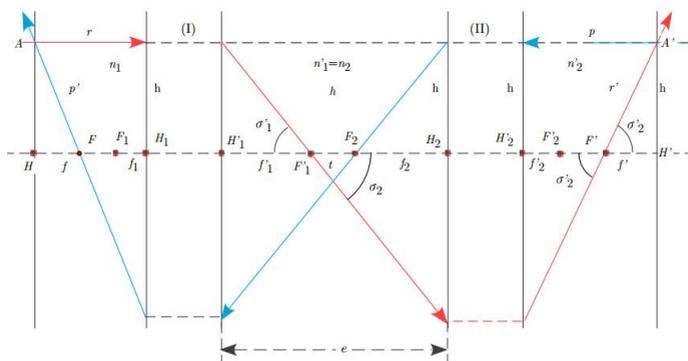


Figura 1.13: Trazado de rayos para un sistema compuesto

El punto  $A'$  en que corta la prolongación del rayo  $r_1$  al  $r'_1$  pertenece al plano principal imagen del sistema total, que determina el punto principal imagen  $H'$ . Análogamente, si se traza un rayo  $r_2$ , en sentido inverso, paralelo al eje del sistema a la misma altura  $h$ , tal como el que pasa por el punto  $A'$ , saldrá del sistema (II) pasando por el foco  $F_2$ , y emergerá del sistema (I) pasando por el foco imagen  $F'$  del sistema total, puesto que ha entrado paralelo al eje del sistema total. Se debe tener en cuenta que al haber invertido el sentido de la luz incidente, el foco  $F_2$  es ahora el foco imagen del sistema (II), y el foco  $F$  es el foco imagen del sistema total.

El punto  $A$  en que corta la prolongación del rayo  $r_2$  al  $r'_2$  pertenece al plano principal objeto del sistema total, que deter-

mina el punto principal objeto H. De la construcción efectuada se deduce que los focos  $F$  y  $F_2$  son puntos conjugados respecto del sistema (I), y  $F'_1$  y  $F'$ , son conjugados respecto del sistema (II).

Si llamamos  $z_1 = F_1F$ , y  $z'_2 = F'_2F'$  y aplicamos la ecuación de Newton a  $F$  y  $F_2$  como puntos conjugados respecto del sistema (I), se tiene:

$$z_1d = f_1f'_1 \quad (1.28)$$

y procediendo de igual forma, con los puntos  $F'_1$  y  $F'$ , como puntos conjugados respecto del sistema (II), se tiene:

$$-dz'_2 = f_2f'_2 \quad (1.29)$$

Entonces de (1.28) y (1.29)

$$z_1 = \frac{f_1f'_1}{d} \quad z_2 = -\frac{f_2f'_2}{d} \quad (1.30)$$

que nos permiten calcular las posiciones de los focos  $F$  y  $F'$  del sistema total referidas al foco objeto del primer sistema y al foco imagen del segundo. De la Figura 1.13 se obtiene para la focal imagen  $f'$  del sistema total:

$$f' = \frac{h}{\sigma'_2} = \frac{h\sigma_2}{\sigma_1\sigma_2} \quad (1.31)$$

ya que  $\sigma'_1 = \sigma_2$ . Y teniendo en cuenta que  $\sigma_2/\sigma'_2$  es la inversa del aumento angular  $\gamma'_2$  que produciría el segundo sistema de un objeto situado en  $F'_1$ , de la figura se deducen las siguientes

relaciones, sin olvidar que se supone que el sistema opera en zona paraxial:

$$\gamma_2'^{-1} = \frac{\sigma_2}{\sigma_2'} \quad (1.32)$$

y, usando (1.24)

$$\frac{1}{\gamma_2'} = \frac{n_2'}{n_2} m_2' \quad (1.33)$$

Ahora, usando (1.12) se encuentra que:

$$m_2 = -\frac{f_2}{a_2 - f_2} = \frac{f_2}{t} \quad (1.34)$$

y aplicando la relación (1.31) al sistema (I) se obtiene:

$$f_1' = \frac{h}{\sigma_1'} \quad (1.35)$$

Dado que la relación entre las distancias focales de un sistema es  $n_2 f_2' = n_2' f_2$ , sustituyendo (1.35) y (1.32) en la ecuación (1.31)

$$f' = \frac{h}{\sigma_2'} = \frac{h \sigma_2}{\sigma_1 \sigma_2} = \frac{f_1'}{\gamma_2'} \quad (1.36)$$

Sustituyendo ahora (1.33), (1.34) y (1.35) en (1.36) obtenemos

$$f' = -\frac{f_1' f_2'}{t} \quad (1.37)$$

análogamente

$$f = -\frac{f_1 f_2}{t} \quad (1.38)$$

Conocidas las distancias focales del sistema total, basta llevarlas, teniendo en cuenta el signo, a partir de los focos, para obtener las posiciones de los planos principales. Si en lugar de referir estas ecuaciones a la distancia y de acoplamiento entre los focos, las referimos a la distancia  $e = H'_1H_2$ , de acoplamiento entre los puntos principales  $H'_1$  y  $H_2$  se deduce de la figura que:

$$t = e - f'_1 + f_2 \quad (1.39)$$

que en (1.37) se reduce a :

$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{e - f'_1 + f_2} \quad (1.40)$$

Cuando la separación entre los planos principales  $HH'$  es despreciable frente a las distancias focales, se dice que el sistema óptico es *delgado*. En este caso, los planos principales aparecen en un plano meridiano (centro del lente) como un segmento perpendicular al eje óptico. Es decir los dos planos principales colapsan en uno solo.

## 1.14. Las Aberraciones geométricas y cromáticas

Cuando la luz transmitida por los sistemas ópticos no se aleja mucho del eje óptico las curvas de los lentes y espejos se confunden con las de la esfera. Tallar lentes o espejos esféricos es mucho mas simple que hacerlos hiperbólicos o parabólicos.

Esta es la razón por la que los sistemas ópticos presentan generalmente elementos esféricos. El estudio de tales sistemas se realiza en el marco de la llamada aproximación *paraxial*. Cuando los sistemas ópticos trabajan con aberturas grandes, los rayos ya no permanecen próximos al eje óptico y se rompe la aproximación paraxial. La consecuencia de usar la parte marginal de las lentes de grandes aperturas es que aparecen las aberraciones. En este sentido, se definen las aberraciones como desviaciones de la aproximación paraxial. En el estudio de la óptica instrumental siempre se supondrán sistemas corregidos en todas sus aberraciones como si de ópticas perfectas se tratase. Pero es importante saber que en la realidad los sistemas ópticos presentan este tipo de desviaciones de la idealidad y es menester del óptico entender cuales son las razones que hacen disminuir la calidad final de la imagen.

Lo que debían ser planos imagen se convierten en superficies curvas; la semejanza entre objeto e imagen no se conserva; la nitidez de los detalles se pierde y aparecen imágenes borrosas, y la luz blanca del objeto aparece dispersa en sus colores por la imagen. Estos defectos se llaman aberraciones y se clasifican de la siguiente manera:

**Las cinco aberraciones geométricas** se dividen en dos:

Aberraciones de punto: la imagen de punto se encuentra en la posición predicha por la óptica paraxial pero, en lugar de un punto, es una “mancha”:

1. Aberración esférica
2. Coma

### 3. Astigmatismo

Aberraciones de forma: la imagen de un punto es un punto pero su posición es distinta de la establecida por la aproximación paraxial:

1. Distorsión
2. Curvatura de campo

Estos cinco defectos comunes de los sistemas ópticos se conocen como las *cinco aberraciones geométricas*.

**La aberración esférica** es la única que afecta a puntos situados en el eje. Los rayos provenientes de un punto del eje que entran en la lente con ángulos grandes (fuera de la aproximación paraxial) no van al foco, sino cerca de él. Los rayos que inciden más hacia los bordes convergen más cerca (o más lejos) de la lente que los que entran por el eje. Las imágenes de los rayos forman una línea sobre el eje cuya longitud se denomina aberración esférica lateral: AEL. También se define como la diferencia entre el foco del rayo marginal y el foco gaussiano. El tamaño de la imagen en el foco paraxial se denomina aberración esférica transversal: AET. También se define como la distancia al eje del punto de incidencia del rayo marginal en el plano focal. La *imagen* de un punto *objeto* es un disco.

Se define al *círculo de mínima confusión* como aquel que obtiene en la intersección de la caústica (curva envolvente de los rayos refractados) con los rayos marginales. Es la mejor imagen, una mancha circular de determinado diámetro, que produce un efecto similar al desenfoque.

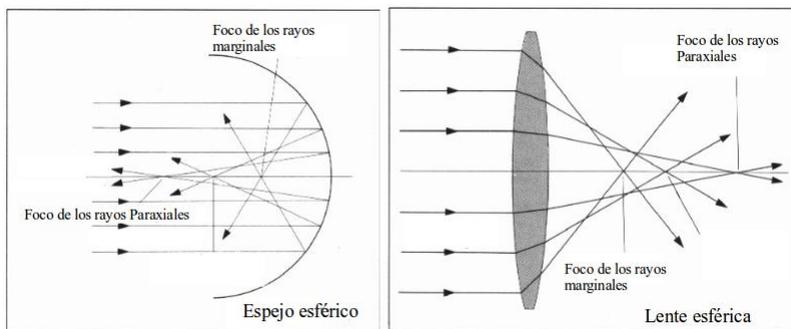


Figura 1.14: Aberración esférica

**Aberración de Coma** Se origina por la dependencia del aumento lateral con la excentricidad del rayo, es decir, que rayos que entran a distinta altura focalizan en distintos puntos del plano imagen.

Debido a su forma, el coma produce una degradación de la imagen muy desagradable como muestra el ejemplo. En fotografía y astro-fotografía, hay objetivos corregidos de coma y esférica que se denominan: aplanáticos

**Astigmatismo** Es una aberración de campo. En puntos fuera del eje, el cono de rayos incidente es asimétrico. Se presenta en un sistema óptico muy diafragmado. En el caso de un sistema óptico muy diafragmado, la imagen de un punto  $A$  sobre el eje es también un punto  $A'$  sobre el mismo eje (astigmatismo sobre

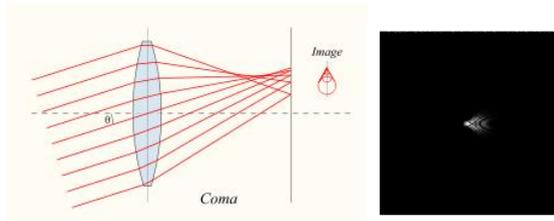


Figura 1.15: Aberración de coma

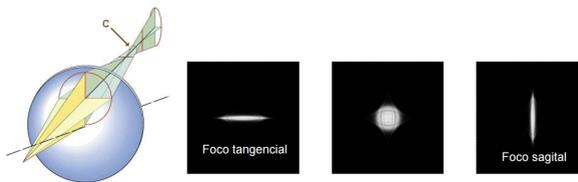


Figura 1.16: Aberración astigmática. La región indicada con la flecha corresponde al círculo de mínima confusión, compromiso entre el foco tangencial y el sagital.

el eje). Sin embargo, si la oblicuidad de un haz luminoso procedente de un punto  $B$  fuera del eje es demasiado grande, el haz emergente ya no es cónico con un solo punto de concurrencia, sino un haz que presenta dos zonas de concentración (o estrechamiento) que son dos pequeños segmentos perpendiculares entre sí, normales a la dirección media del haz. Estos segmentos son denominados focal sagital y focal tangencial, o también focales de Sturm.

El plano de máxima asimetría llamado plano meridional (o tangencial) contiene el eje y el rayo principal. El plano perpendicular a éste que contiene al rayo principal se llama plano sagital. Los rayos que entran por uno u otro plano focalizan en distintos puntos y para puntos fuera de eje, el foco meridional y sagital siempre son distintos (ver Figura 1.16). La imagen de un punto en los focos tangencial y sagital es una línea. El astigmatismo se define como la distancia entre el foco meridional y el sagital. Depende de:

1. La focal de la lente
2. El ángulo de los rayos
3. La distancia al eje

La mejor imagen se obtiene para una posición entre ambos focos y se denomina círculo de mínima confusión.

**Distorsión** La distorsión es una aberración de forma. A un punto objeto, le corresponden un punto en la imagen pero el aumento lateral es función de la altura del objeto. Puede ser positiva (distorsión de corsé) mayor aumento para puntos más alejados del eje o negativa (distorsión de barril) menor aumento al acercarnos al eje (Figura 1.17). La distorsión se manifiesta en la forma del objeto, afectando particularmente a los bordes. La distorsión de barril es muy importante en objetivos gran angular y objetivos de ojo de pez que se utilizan en fotografía para fotografiar campos muy amplios ( $60^{\circ}$ - $180^{\circ}$ ) en espacios reducidos. Los objetivos corregidos de distorsión se llaman ortóscopos.



Figura 1.17: Aberración de distorsión. a) distorsión de corsé. b) distorsión de barril

**Curvatura de campo** La imagen de un plano, es realmente una superficie esférica llamada superficie de Petzval (Figura 1.18). El sentido de esta curvatura dependerá de si la lente por la que pasa es positiva o negativa. En fotografía, se soluciona en algunos casos curvando el sensor en la cámara en el mismo sentido que el plano focal o con objetivos aplanáticos. Los objetivos macro (para objetos pequeños a corta distancia) son los que mejor corrigen esta aberración.

**Aberración cromática** Se debe a la variación del índice de refracción con la longitud de onda de la luz  $\lambda$ . Como consecuencia, el foco y los aumentos dependen de  $\lambda$ . Para el vidrio,  $n(\lambda)$  decrece con  $\lambda$  en el visible, así que la focal aumenta con la longitud de onda. Su efecto es que cualquier lente simple se comporta

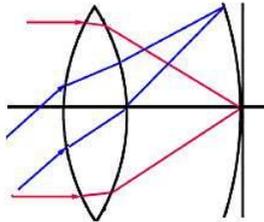


Figura 1.18: Aberración de curvatura de campo

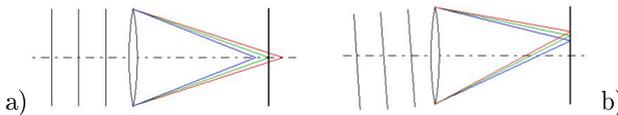


Figura 1.19: Aberración cromática. a) Axial. b) Lateral.

como un prisma descomponiendo la luz en sus colores primarios y formando un pequeño espectro alrededor del foco de la lente.

Se dividen en dos tipos:

1. Aberración cromática axial: Diferencia de foco para dos longitudes de onda
2. Aberración cromática lateral: Diferentes aumentos para distintas longitudes de onda

Los dos tipos de aberración cromática producen “bordes coloreados” (Figura 1.20) pero tienen propiedades diferentes: La axial: Produce halo coloreado alrededor de todo el objeto. Ocurre en

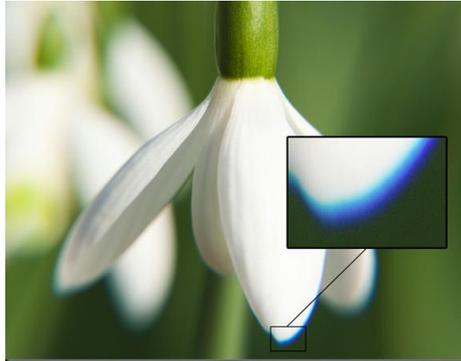


Figura 1.20: Bordes coloreados debido a la aberración cromática

cualquier posición de la imagen. Mejora al disminuir la apertura  
El halo para un objeto enfocado tiene sólo un color La lateral:  
Sólo afecta detalles tangenciales. No aparece en el centro de la  
imagen, y aumenta hacia las esquinas. No disminuye al reducir  
la apertura. Se manifiesta más en zonas desenfocadas de la  
imagen.

## Capítulo 2

# Fotometría

Desde el punto de vista de la óptica instrumental es necesario entender la dependencia del diseño del instrumento con las características de luminosidad que éste presenta al ojo. Para ello es inevitable el entendimiento racional de lo que *luminosidad* significa. La ciencia que estudia de la medida de la luz, como el brillo percibido por el ojo humano es conocida como Fotometría. Es decir, estudia el efecto que la radiación electromagnética provoca el sistema visual. No debe confundirse con la Radiometría, encargada de la medida de la luz en términos de potencia electromagnética absoluta (visible o no).

## 2.1. Eficacia luminosa

El ojo humano percibe la radiación electromagnética en un rango de longitudes de onda que va desde los 400 nm hasta los 700nm. Este *rango espectral* es lo que se conoce como luz visible. Aunque el ojo es sensible a todas estas longitudes de onda percibiéndolas como colores, es claro que no tiene la misma sensibilidad para todas ellas. La Fotometría introduce este hecho ponderando las diferentes magnitudes radiométricas medidas para cada longitud de onda por un factor que representa la sensibilidad del ojo promedio. La función que introduce estos factores es conocida como *función de eficiencia luminosa* y se suele denotar como  $V_\lambda$  o  $V(\lambda)$  para hacer notar su dependencia con la longitud de onda. Dicha función es calibrada según un ojo modelo y es diferente dependiendo de que el ojo se encuentre adaptado a condiciones de buena iluminación (visión fotópica sensible al color) o de escasa (visión escotópica). Así, en condiciones fotópicas, la curva alcanza su pico para 555 nm, mientras que en condiciones escotópicas lo hace para 505 nm ver Figura 2.1.

## 2.2. Ángulo sólido

Los conceptos de intensidad lumínica, cantidad de luz y flujo luminoso que se trataran en las siguientes secciones hacen uso del concepto de *ángulo sólido*. El ángulo sólido es el ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado, que se corresponde con la zona del espacio limitada por una superficie

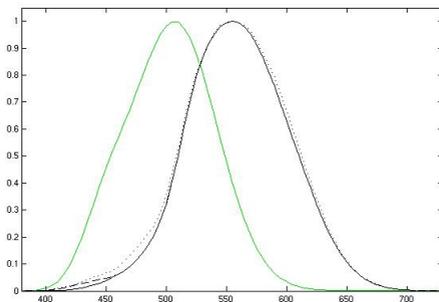


Figura 2.1: Función de luminosidad fotópica (negro) y función de luminosidad escotópica (verde) en función de la longitud de onda en nanómetros.

cónica (Figura 2.2). Mide el tamaño aparente de ese objeto.

El ángulo sólido es el área del casquete esférico, en una esfera de radio unidad, abarcado por un cono cuyo vértice está en el centro de la esfera. Es una magnitud adimensional que se representa con la letra griega  $\Omega$ .

Para calcular el ángulo sólido bajo el cual se ve un objeto desde un punto, se proyecta el objeto sobre una esfera de radio  $R$ , centrada en el punto de vista. Si la superficie de la proyección del objeto sobre la esfera es  $S$ , el ángulo sólido bajo el cual se ve el objeto es:

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \quad (2.1)$$

Para determinar la expresión del elemento de ángulo sólido

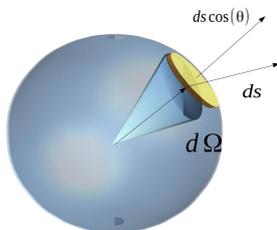


Figura 2.2: Ángulo sólido

$\Omega$  bajo el cual se ve un elemento de superficie  $dS$  de la Figura 2.2 desde el centro de la esfera se proyecta el vector *elemento de superficie*  $d\mathbf{S}$  en la dirección radial procedente del centro de la esfera y que pasa por el centro de dicho elemento. El escalar  $dS \cos \theta$  representa la proyección del vector  $d\mathbf{S}$  en la dirección radial  $\mathbf{e}_r$ , es decir que

$$d\mathbf{S} \cdot \mathbf{e}_r = dS \cos \theta. \quad (2.2)$$

Una simple relación de semejanza entre la componente del área a una distancia  $r$  y el área subtendida en la esfera unitaria (reconociendo que la superficie de una esfera varía como  $r^2$ ), permite escribir:

$$d\Omega = \frac{\mathbf{e}_r \cdot d\mathbf{S}}{r^2} \quad (2.3)$$

conocida como *ángulo sólido elemental*. Luego el ángulo sólido

de una superficie cualquiera  $S$  sera

$$\Omega = \iint_s \frac{\mathbf{e}_r \cdot d\mathbf{S}}{r^2} \quad (2.4)$$

donde la integral de superficie se extiende sobre  $S$ .

### 2.3. Flujo luminoso

El flujo luminoso es la medida de la potencia luminosa. Definida a partir del *flujo radiante*, ajustada mediante la sensibilidad del ojo humano a diferentes longitudes de onda. Si  $\phi(\lambda)$  representa el flujo radiativo (potencia electromagnética)<sup>1</sup> para una determinada longitud de onda  $\lambda$ , entonces el flujo luminoso  $F$  de la radiación monocromática con longitud de onda  $\lambda$  es proporcional al producto del flujo radiativo  $\phi(\lambda)$  y la eficiencia luminosa  $V(\lambda)$ , entonces

$$F(\lambda) \propto \phi(\lambda)V(\lambda) \quad (2.5)$$

Su unidad de medida en el Sistema Internacional de Unidades es el lumen (lm) y se define a partir de la unidad básica del SI, la candela (cd), definida históricamente a partir de la cantidad de luz que emite una lampara unidad (aproximadamente la luz emitida por la flama de una vela, bujía o candela de cera). Este

---

<sup>1</sup>el lector que esté familiarizado con las ondas electromagnéticas reconocera al flujo radiativo  $\phi$  como la integral de flujo del vector de Poynting  $\mathbf{S}$  en una superficie.

criterio permite definir el factor de proporcionalidad entre el flujo luminoso, flujo radiativo y la eficiencia luminosa

$$F(\lambda) = 683,002 \phi(\lambda)V(\lambda) \quad (2.6)$$

Entonces una luz monocromática de 555 nm (color verde) con un flujo radiante de 1 W, genera un flujo luminoso de 683,002 lm, que corresponde con la máxima respuesta del ojo humano. Por otro lado, si la fuente radiativa no es monocromática el flujo total es la suma de cada color:

$$F = 683,002 \int \phi(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (2.7)$$

En rigor la ec.2.6 define la densidad espectral de flujo lumínico y la integral ec.2.7, el flujo total.

## 2.4. Energía luminosa o cantidad de luz

Si el Flujo luminoso esta referido a la potencia radiante entonces podemos definir la *energía luminosa* como la cantidad total de luz irradiada durante algún intervalo de tiempo. Si el flujo luminoso se mantiene constante en un período dado  $\tau$ , entonces se tiene que:

$$H = F \cdot \tau \quad (2.8)$$

si no, la expresión válida sería la integral del flujo luminoso respecto al tiempo:

$$H = \int_{\tau} F dt \quad (2.9)$$

Es claro que si el flujo  $F$  tiene por unidad el lumen (lm) entonces la energía luminosa tendrá por unidad el lumen segundo (lm s) que a veces se la denomina talbot, ajena al Sistema Internacional.

## 2.5. Intensidad luminosa

Definida como la cantidad de luz que emite una fuente por unidad de ángulo sólido, la intensidad luminosa es la unidad fundamental de la fotometría. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es la candela (Cd). En términos del flujo, su definición es:

$$I = \frac{dF}{d\Omega} \quad (2.10)$$

de esta definición se deduce que la intensidad luminosa es el flujo  $F$  que, partiendo de una fuente puntual, se propaga por unidad de ángulo sólido  $\Omega$  en una determinada dirección del espacio.

Si se conoce la densidad de flujo lumínico  $F(\lambda)$  entonces

$$\begin{aligned} I &= 683,002 \frac{d}{d\Omega} \int \phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \\ &= 683,002 \int \frac{d\phi(\lambda)}{d\Omega} V(\lambda) d\lambda \\ &= \int I(\lambda) V(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.11)$$

donde  $I(\lambda) = 683,002 d\phi/d\Omega$  es la densidad espectral de intensidad luminosa.

Fuente	Intensidad aproximada en candelas
vela, bujía o candela de cera	1
lampara incandecente de 40 W	40
lampara fluorecente de 30 W	200
lampara led de 30 W	300

Cuadro 2.1: Intensidades luminosas típicas

Una fuente puntual es aquella que emite la misma intensidad luminosa en todas las direcciones y no pose dimensiones (o sean despreciables). Un ejemplo práctico sería la flama de una vela. Entonces, si el flujo luminoso (en lúmenes) es una medida de la potencia luminosa que emite una vela, la intensidad luminosa (en candelas) sera una medida de cuanto brillo tiene el haz en una dirección particular. Intuitivamente el flujo  $F$  esta relacionado con la cantidad de luz y la intensidad con su concentración o enfoque.

## 2.6. Iluminancia

Flujo  $F$  que incide sobre una superficie por unidad de área:

$$E = \frac{dF}{dS} \quad (2.12)$$

De esta relación se puede deducir que es la densidad superficial de flujo luminoso. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el lumen por metro cuadrado ( $\text{lm m}^{-2}$ ) denominado

Fuente	Iluminancia aproximada en lux
rayos solares sup de la tierra	$10^5$
interior en pleno día	50 a 100
Lugares de trabajo, oficinas	100
luz de luna llena	0.2

Cuadro 2.2: Valores típicos de iluminancia

lux. La iluminancia se pueden medir con un aparato llamado fotómetro.

## 2.7. Luminancia

Intensidad emitida por una fuente extensa por unidad de superficie según una dirección dada:

$$L = \frac{d^2F}{dS d\Omega \cos \theta} \quad (2.13)$$

Es decir, la luminancia es la densidad angular y superficial de flujo luminoso que incide, atraviesa o emerge de una superficie siguiendo una dirección determinada. Alternativamente, también se puede definir como la densidad superficial de intensidad luminosa en una dirección dada. El ángulo  $\theta$  es justamente el ángulo que forma el flujo que incide o atraviesa la superficie  $S$ . Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el lux/sr, Nits o candelas por metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).

La luminancia es el concepto relacionado con la sensación de brillo o la brillantez percibida por el sentido de la vista.

Fuente	Luminancia aproximada en Nits
Sol	$1,6 \cdot 10^9$
Luna	$4 \cdot 10^3$
vela, bujía o candela de cera	$5 \cdot 10^3$
monitor de computadora	300 – 800

Cuadro 2.3: Luminancias típicas

## 2.8. Leyes básicas de la fotometría

### Ley del inverso del cuadrado

Considérese el problema de determinar qué iluminancia produce una fuente puntual sobre una superficie cuyos puntos equidistan de la fuente. Esta superficie puede ser un domo o casquete esférico próximo a la fuente o una pantalla plana a una gran distancia de aquella. Si consideramos una fuente puntual de intensidad luminosa  $I$  que ilumina uniformemente en todas direcciones, dentro de un ángulo sólido  $\Omega$  se propagará a partir de ella un flujo también uniforme

$$I = \frac{dF}{d\Omega} \quad (2.14)$$

y el flujo sera simplemente

$$dF = I d\Omega \quad (2.15)$$

Téngase en cuenta el caso del domo esférico como pantalla donde incide el haz luminoso. Este domo tendrá un radio  $r$  y la fuente

estará en su centro. Dado que el ángulo sólido de un casquete esférico subtendido desde el centro es

$$\Omega = \frac{S}{r^2} \Rightarrow S = \Omega r^2 \quad (2.16)$$

y como la superficie del casquete varía linealmente con el ángulo sólido  $\Omega$

$$dS = r^2 d\Omega \quad (2.17)$$

Por último, la definición de iluminancia dará

$$E = \frac{dF}{dS} = \frac{Id\Omega}{r^2 d\Omega} \quad (2.18)$$

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (2.19)$$

Relación conocida como *ley del inverso del cuadrado* que se puede enunciar así: *La iluminancia producida por una fuente puntual uniforme sobre una superficie cuyos puntos equidistan de la misma, es directamente proporcional a la intensidad de la fuente e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia hasta la superficie iluminada.*

## Ley de Lambert

Se llama superficies emisoras o difusoras de luz perfectas o lambertianas a aquéllas que tienen la misma luminancia en todas las direcciones del espacio.

La luminancia de una superficie en una dirección cualquiera del espacio que forma un ángulo  $\theta$  con su normal es

$$L(\theta) = \frac{I}{S \cos \theta} \quad (2.20)$$

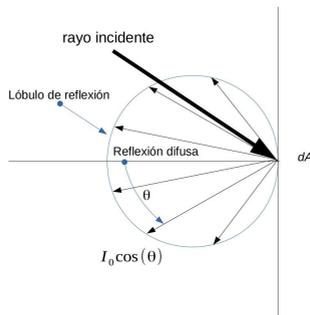


Figura 2.3: Diagrama polar de reflexión en una superficie Lambertiana

y despejando se ve que

$$I(\theta) = LS \cos \theta \quad (2.21)$$

Dado que en  $\theta = 0$   $I = LS = I_0$

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta \quad (2.22)$$

que es la expresión de la *ley de Lambert* o *ley del coseno*, que se puede enunciar de la siguiente forma: *La intensidad de un emisor o difusor perfecto es proporcional al coseno del ángulo con que se observa, medido con respecto a la normal.*

Cuando se representa la intensidad de una superficie lambertiana frente al ángulo en un diagrama polar (Ver Figura 2.3), la

gráfica resultante es una circunferencia cuyo diámetro coincide con la dirección de la normal a la superficie. Cuanto más circular es el diagrama polar de intensidad de una superficie real, tanto más se parecerá su comportamiento al de una superficie lambertiana, y viceversa.

## 2.9. Reflexión y transmisión

Cuando un instrumento óptico refracta o refleja la luz que incide sobre él, parte de la energía lumínica será transmitida, parte reflejada y parte absorbida por los elementos (lentes o espejos) que lo componen. Este fenómeno ocurrirá siempre, sin importar que propiedades tenga un espejo, siempre absorberá parte de esta energía incidente. Lo mismo ocurre con cada lente. Debido al cambio en el índice de refracción aire-vidrio, por más transparente o reflectante que este elemento sea. Incluso el vidrio óptico absorbe la luz que lo atraviesa, aproximadamente un 1% por cada centímetro de vidrio recorrido. Como el flujo lumínico es energía por unidad de tiempo (ponderada por la función de eficiencia lumínica), tiene que cumplirse el siguiente balance

$$F_i = F_r + F_t + F_a \quad (2.23)$$

donde  $F_i$ ,  $F_r$ ,  $F_t$  y  $F_a$  son los flujos incidente, reflejado, transmitido y absorbido respectivamente en cada superficie refractora

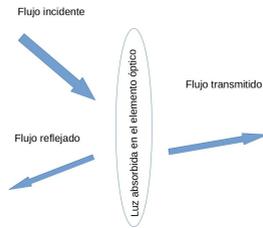


Figura 2.4: Reflexión y transmisión en un elemento óptico

o reflectora del sistema óptico. Entonces si llamamos

$$R = \frac{F_r}{F_i} \quad (2.24)$$

$$T = \frac{F_t}{F_i} \quad (2.25)$$

$$A = \frac{F_a}{F_i} \quad (2.26)$$

a la fracción del flujo que se refleja, transmite y absorbe podemos ver que:

$$T = 1 - R - A \quad (2.27)$$

y si despreciamos el flujo absorbido

$$T = 1 - R \quad (2.28)$$

La óptica ondulatoria prevé que en cada superficie de separación de dos medios de índices  $n$  y  $n'$ , el factor de reflexión vale

$$R = \frac{n - n'}{n + n'} \quad (2.29)$$

En superficies con índices similares las pérdidas serán pequeñas. En cambio, en las superficies que separan un vidrio del aire, la diferencia de índices es notable y las pérdidas de flujo por reflexión son aproximadamente un cuatro por ciento por cada superficie. Tratamientos ópticos pueden disminuir notablemente estas pérdidas (cita). Estos tratamientos consisten en depositar en cada superficie un recubrimiento con una lámina muy delgada de otro material.

Si el instrumento posee  $i$  superficies con índices  $n$  y  $n'$ , el flujo transmitido será:

$$F_i = (1 - R)^i F_i \quad (2.30)$$

Esta es la razón por la cual los objetivos fotográficos que tienen una gran cantidad de elementos son tratados con recubrimientos antirreflejo y los sistemas telescópicos son construidos con la menor cantidad de elementos a fin de minimizar las pérdidas.

## Problemas

1. Un ángulo sólido central corta en la superficie de una esfera con radio igual a  $50\text{cm}$ , un área igual a  $1200\text{cm}^2$ . ¿Qué área cortará en la superficie de otra esfera el mismo ángulo, si el radio de esta segunda esfera es más grande en  $40\text{cm}$ ?

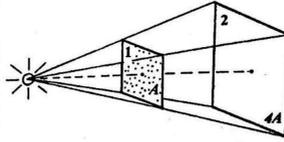


Figura 2.5: Esquema del problema 4

2. Una fuente puntual se encuentra en el centro de una esfera de  $70\text{cm}$  de radio y emite un flujo luminoso de  $600\text{lm}$  hacia la superficie de esta esfera con un área de  $3\text{m}^2$ . Calcular: a) Su intensidad luminosa. b) El flujo luminoso total que emite la fuente.
3. ¿Qué flujo luminoso incide sobre la superficie de una mesa, si su iluminación media es  $9500\text{lx}$ , y el área  $1,6\text{m}^2$ ?
4. Se han colocado normalmente a la radiación luminosa dos láminas de áreas  $A_1 = A$  y  $A_2 = 4A$ . Si la iluminación en la primera es igual a  $20\text{lx}$ , ¿Cuál será la iluminación en la segunda lámina? (Suponer que para el segundo caso, la primera lámina está retirada).
5. Una lámpara incandescente irradia un flujo luminoso de  $100\text{lm}$ . ¿Cuál es la intensidad luminosa de la lámpara?
6. Calcular la intensidad luminosa media de una bombilla cuya potencia es  $120\text{W}$ , si su rendimiento luminoso es igual a  $11\text{W}/\text{lm}$ .

7. La iluminación de la superficie de un patio amplio es  $1600lx$  cuando el ángulo de elevación del sol es  $53^\circ$ . Calcular la iluminación cuando el ángulo de elevación del sol sea  $37^\circ$
8. Una bombilla de  $160cd$  cuelga sobre el centro de una mesa circular a la altura de  $80cm$ . Calcular la iluminación máxima y mínima en la superficie de la mesa, si su radio es de  $60cm$ .
9. Una pequeña superficie se iluminaba con una lámpara de  $90cd$ . Ésta última fue sustituida por otra lámpara de  $40cd$ . ¿En cuántas veces será necesario disminuir la distancia de la lámpara hasta la superficie para que la iluminación no varíe?
10. Una pequeña pantalla se ilumina por 16 velas muy juntas entre sí, encontrándose a  $1,2m$  de la pantalla. Si se apagan 7 velas. ¿En cuánto será necesario desplazar la pantalla para que su iluminación no cambie?
11. Una lámpara de  $30cd$  está colocada a  $25cm$  de una pantalla. ¿A qué distancia de la pantalla y del mismo lado que la primera lámpara habría que colocar una lámpara de  $240cd$  para que la iluminación total de la pantalla sea el triple de la inicial?
12. En los vértices de un cubo de arista de  $2m$  se han colocado focos luminosos de intensidad  $I = 120cd$ . ¿Cuál será la iluminación total que ellos producen en el centro del cubo?

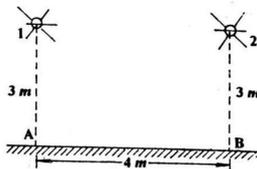


Figura 2.6: Esquema del problema 13

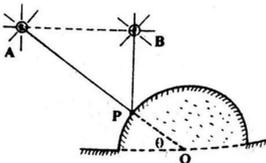


Figura 2.7: Esquema del problema 14

13. Dos focos 1 y 2 producen en conjunto sobre A y B iluminaciones de  $583lx$  y  $554lx$  respectivamente. ¿Cuáles son las intensidades luminosas de dichos focos?
14. Dos focos A y B de igual intensidad luminosa, se encuentran en la misma horizontal (Figura 2.7). Un punto P ubicado verticalmente debajo del foco B presenta una iluminación total igual al triple del generado por el foco A. ¿Cuál es la medida del ángulo  $\theta$  que define la posición del punto P?

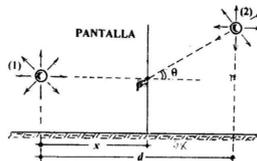


Figura 2.8: Esquema del problema 15

15. Dos focos puntuales de igual intensidad luminosa se encuentran a una distancia horizontal de  $d = 3,5m$ . Figura 2.8¿A qué distancia del foco 1 se debe colocar una pantalla para que la iluminación producida por ambos focos en P sea la misma?
16. Un foco luminoso ubicado a  $2m$  de altura produce una iluminación de  $125lx$  en un punto A de dicha superficie colocado directamente debajo del foco. Si ahora el foco sube una distancia  $x$  y se desplaza horizontalmente la misma distancia produce una iluminación de  $4lx$  en A. ¿Cuál es el valor de  $x$ ?
17. Si la iluminación del sol en la tierra al mediodía (superficie normal a los rayos solares) es de  $E = 105lx$  calcule: a) El flujo luminoso total F. b) La Luminancia L (Datos: Distancia de la Tierra al Sol = 150 millones de km. Diámetro del Sol = 1.4 millones de km)
18. Determinar a qué altura del centro de una mesa redonda de radio 1 m debe colocarse un foco puntual para que la

iluminación en los bordes sea máxima.

## Capítulo 3

# Aspectos generales de los Instrumentos

### 3.1. Clasificación

Los instrumentos ópticos formadores de imágenes se pueden clasificar en dos grandes grupos: Los llamados instrumentos *objetivos* y los *subjetivos*. El resto tiene por objeto el estudio de la luz, ejemplo: espectrógrafos (determinación de longitudes de onda), fotómetros (medida de intensidades luminosas) o las propiedades ópticas de la materia: refractómetros (medida de los índices de refracción), etc. Estos últimos instrumentos no son objeto de estudio en este curso que trata exclusivamente de los primeros.

### 3.1.1. Instrumentos ópticos Objetivos

Este tipo de instrumentos se caracterizan por formar una imagen real del objeto observado. La cámara fotográfica, el proyector de video o cine y el telescopio solar sin ocular son ejemplos de instrumentos objetivos. Toman este nombre debido a que la imagen que forman es *objetiva* (no requiere de la interpretación del ojo para justificar su existencia). Se caracterizan por su aumento lineal dado que la imagen, al ser real, puede medirse en forma directa.

### 3.1.2. Instrumentos ópticos subjetivos

Al contrario que los anteriores, estos instrumentos de observación dan imágenes virtuales de objetos reales o de imágenes intermedias reales proporcionadas por los objetivos. Estos instrumentos de observación se caracterizan por su potencia y su poder separador. Toman este nombre debido a que la imagen requiere del ojo para su interpretación por lo que sus medidas de aumento claridad y poder separador son definidas como comparación de la imagen a ojo desnudo. Los anteojos aéreos, lupas, microscopios y telescopios de observación directa son ejemplos de instrumentos subjetivos.

## 3.2. Parametros generales

Un estudio preliminar sobre ciertas características comunes a todos los instrumentos ópticos es conveniente ya que los parámetros definidos en ellos son idénticos o equivalentes.

1. Aumento lateral, aumento visual y , potencia: Estos parámetros permiten comparar las dimensiones lineales o angulares de la imagen y del objeto, independientemente de la limitación de los haces útiles.
2. Claridad: Permite comparar las magnitudes fotométricas de la imagen y del objeto, dependiendo de la limitación de los haces útiles.
3. Campo: Define la porción de espacio objeto del que el instrumento da imágenes satisfactorias, dependiendo de la limitación de los haces útiles.
4. Poder separador: Mide la capacidad de un instrumento para percibir los pequeños detalles de un objeto, dependiendo de la limitación de los haces útiles.

### 3.3. Aumento

**Aumento lateral** Tal como se definió ya en el Capítulo 1 (ecuación 1.1), al cociente entre una dimensión lineal de la imagen y la dimensión correspondiente a su conjugado, esto es el objeto se define como *aumento lateral*

$$m = \frac{y'}{y} \quad (3.1)$$

este resultado se utiliza sobre todo en los sistemas ópticos objetivos.

**Aumento visual** La magnitud utilizada en los instrumentos subjetivos es el *aumento visual*. Es el cociente entre las dimensiones aparentes de la imagen, obtenidas a través del instrumento, y las del objeto observado por el ojo desnudo:

$$M = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} \quad (3.2)$$

El aumento visual interviene en los instrumentos subjetivos (lupas, oculares positivos, microscopios...). El aumento visual representa el beneficio que tiene para el ojo hacer uso del instrumento, ya que  $\tan \omega$  y  $\tan \omega'$  son proporcionales a las magnitudes lineales que se proyectan en la retina del observador. Es un número abstracto que depende del instrumento y del observador. Este es un número no intrínseco que depende, como se puede observar en la Figura 3.1, de la distancia entre el observador y el objeto. Por ello y para tener valores de  $M$  comparables para los distintos instrumentos para observación de objetos cercanos, es necesario fijar un valor determinado para dicha distancia, que suele ser el de las mejores condiciones de visión para el ojo desnudo emétrope.

si definimos la potencia dióptrica por

$$P = \frac{\tan \omega'}{y} \quad (3.3)$$

y hacemos

$$Py = \tan \omega' \quad (3.4)$$

y para el caso de la observación directa tenemos

$$\frac{y}{d} = \tan \omega \quad (3.5)$$

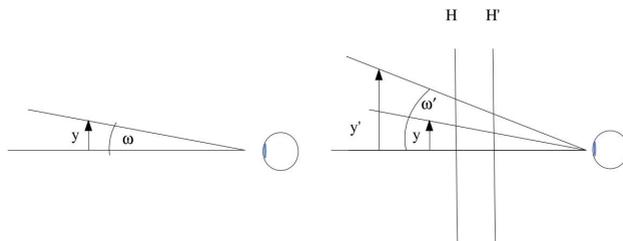


Figura 3.1: Aumento visual

entonces para el aumento visual :

$$M = \frac{y'P}{y/d} = Pd \quad (3.6)$$

Se toma convencionalmente  $d = 0,25m$ , para el ojo emетроpe, lo que da lugar a la definición de aumento visual comercial o convencional:

$$Mc = \frac{P}{4} \quad (3.7)$$

El valor  $Mc$  es el que se suele dar en el comercio para indicar el aumento de lupas y oculares. Si la distancia  $d$  entre el ojo y la imagen es igual a la distancia a que se observaría el objeto con el ojo desnudo (y solo en este caso), el aumento visual coincide

con el aumento lateral:

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{d \tan \omega'}{d \tan \omega} = M \quad (3.8)$$

En el caso de que el objeto esté en el infinito (telescopio),  $d \rightarrow \infty$  evidentemente solo se puede definir el aumento visual como la relación entre las dimensiones aparentes de la imagen vista a través del instrumento y del objeto, visto por el ojo desnudo.

### **3.3.1. Claridad**

### **3.3.2. Campo**

### **3.3.3. Poder separador**