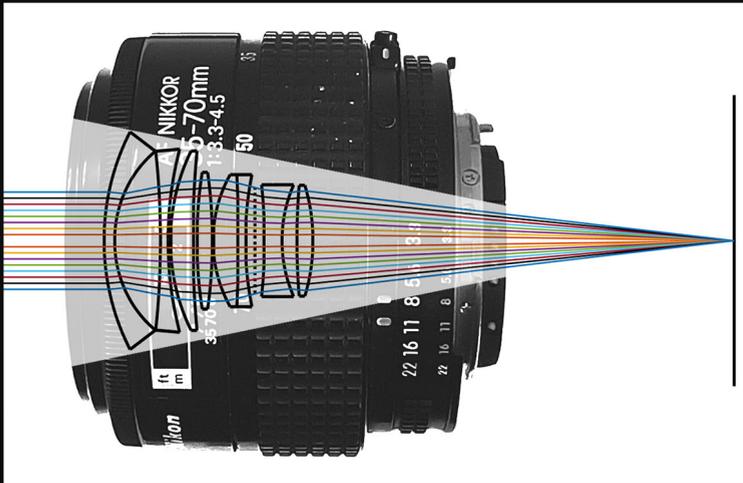


Vol. III

ÓPTICA **AVANZADA** PARA FOTÓGRAFOS



Jorge **Igual**

SERIE ÓPTICA Y FOTOGRAFÍA

Óptica avanzada para fotógrafos

Jorge Igual

<http://fotoigual.com>



Resumen

Una cámara de fotos se compone de dos partes: el objetivo, responsable que las imágenes sean lo más nítidas posible, y el cuerpo, con el sensor que se encarga de registrarlas y el procesador que controla todo. Este libro trata sobre el primer elemento: el objetivo.

Forma parte de la serie de libros *Óptica y Fotografía*, dedicada a explicar todo lo relacionado con la parte óptica en Fotografía. En los volúmenes previos hemos explicado los fundamentos ópticos de una lente, su relación con el sensor, la profundidad de campo y la distancia hiperfocal. Para ello usamos el modelo de lente delgada, que supone que un objetivo se puede sustituir por una única lente sin grosor. Es un modelo muy sencillo que permite entender muchos conceptos básicos en Fotografía.

Sin embargo, ese modelo resulta insuficiente para explicar cómo funciona un objetivo real. Por ejemplo, ¿qué significa realmente que la distancia focal de un objetivo valga 50 mm? ¿De dónde a dónde hay 50 mm? Este volumen resuelve esta duda y muchas más presentando el modelo de lente gruesa y aplicándolo al estudio de objetivos reales. Para ello no solo vamos a explicar conceptos como distancia mínima de enfoque, zoom, diafragma, pupila, distancia focal, auto-focus, etc., sino que vamos a ser capaces de reproducir y estudiar en detalle algunos objetivos.

Para reproducir el diseño de un objetivo y poder analizar su comportamiento hacen falta muchos datos técnicos: número de lentes que tiene, distancia entre ellas, forma de sus superficies, materiales, etc. Afortunadamente, muchos fabricantes patentan sus objetivos, así que es posible acceder a esos datos y reconstruir diseños y comportamientos simplemente a partir de los datos que ellos mismos facilitan.

Así pues, el principal objetivo del libro no es solo explicar los principales conceptos ópticos en Fotografía, sino ponerlos en práctica usando los datos técnicos de su diseño. De esta forma, serás capaz al acabar el libro de no solo entender de verdad todas las especificaciones técnicas de un objetivo, sino incluso modelarlo por ti mismo y ser capaz de obtener dichos valores, por ejemplo, la magnificación máxima.

Un objetivo se compone de muchas lentes. El primer capítulo explica cómo son dichas lentes, el funcionamiento óptico de un objetivo y cómo podemos reconstruirlo a partir de los datos de sus lentes. A lo largo del libro iremos desarrollando los diferentes conceptos introducidos en el primer capítulo, no solo desde un punto de vista teórico, sino analizando objetivos reales.

Toda la óptica fotográfica se fundamenta en un principio que conocemos todos desde niños: la ley de Snell, que explica cómo se doblan los rayos al cambiar de medio. Todo se deriva de ahí. Así que el segundo capítulo repasa cómo se desvían los rayos a medida que van atravesando el objetivo hasta que llegan al sensor. Presentamos el parámetro posiblemente más importante de un objetivo: su distancia focal, y cómo se puede calcular a partir del trazado de rayos. Por fin te quedará claro qué significa que un objetivo tenga distancia focal 50 mm.

El tercer capítulo es el cerebro del libro. En el segundo capítulo hemos visto cómo podemos saber si un objetivo enfoca o no a partir

de sus datos técnicos como número de lentes, forma de las superficies, índice de refracción o distancia entre ellos. Conocidos los datos técnicos del objetivo, podemos trazar rayos gracias a la ley de Snell y comprobar si los rayos que provienen de un mismo objeto acaban convergiendo sobre un mismo punto en el sensor o no; o sea, si el objetivo enfoca o no.

Aunque el trazado de rayos es el método que se usa realmente para diseñar objetivos y permite ver cómo viajan los rayos de luz mientras atraviesan un objetivo, no ayuda a obtener un modelo sencillo de un objetivo. En el capítulo tres, gracias a unas propiedades que cumplen los rayos que viajan cerca del eje óptico, explicamos cómo un objetivo al completo, con sus 15 o 20 lentes, se puede sustituir por una única lente definida por unos pocos parámetros. Se llama modelo de lente gruesa. Es una extensión del modelo de lente delgada, donde se supone que la lente equivalente no tiene grosor.

El modelo de lente gruesa es tan sencillo que para explicar cómo funciona un objetivo bastan cuatro parámetros: los focos y los puntos principales del objetivo. Explicamos qué son, cómo se calculan con múltiples ejemplos reales y qué implicaciones tienen.

Aprendido cómo modelar un objetivo y cómo parametrizarlo, el cuarto capítulo explica cómo funciona el enfoque de una cámara. Explicamos qué cambia en un objetivo cuando cambiamos la distancia de enfoque y cómo funciona el autofocus de una cámara; es decir, cómo es capaz la cámara de averiguar cuál es la distancia de enfoque adecuada para obtener una foto nítida. De regalo entenderemos qué es un objetivo zoom y cómo consigue cambiar la distancia focal.

En el quinto capítulo presentamos otro elemento básico en un objetivo: el diafragma. El diafragma sirve para regular la cantidad de luz que llega al sensor (la exposición) y afecta a otros muchos aspectos fotográficos como la profundidad de campo. Las imágenes del dia-

fragma se llaman pupilas y juegan un papel muy importante para entender lo que le pasa a la luz en un objetivo, sobre todo cuando las distancias de enfoque son pequeñas como en macrofotografía. La unidad que mide lo abierto que está el diafragma se llama número f . Explicamos no solo qué significa realmente sino cómo afecta al número f que enfoquemos más o menos cerca.

Como un objetivo siempre va asociado a un sensor que registra la imagen y el sensor tiene dimensiones finitas, aparece el concepto de ángulo de visión. Explicamos cómo se mide y muchas relaciones útiles entre pupilas, diafragma, sensor y ángulo de visión. Por último, el quinto capítulo también analiza otros factores que pueden afectar a la exposición como el viñeteo de un objetivo y temas relacionados como la profundidad de campo.

El libro incluye un anexo donde se demuestran algunas expresiones matemáticas ópticas usadas en el texto.

El libro está enfocado a fotógrafos que no tengan miedo a las matemáticas/óptica. Si todavía tienes pesadillas de tu época escolar con los ángulos, no te lo aconsejo. Si, por contra, estás harto de hacer fotos y leer especificaciones técnicas de objetivos preguntándote cómo funcionan de verdad y qué significan muchos de esos datos, o simplemente disfrutas aprendiendo el porqué de las cosas, sí te lo aconsejo. El segundo y tercer tema son los más densos matemáticamente hablando. Tampoco es que haga falta ser ingeniero. Las matemáticas necesarias son las mismas que ya sabías con 15 años: saber resolver una ecuación y saber sacar relaciones entre lados de triángulos a partir de un dibujo.

De todas formas no hay que perderse en los detalles matemáticos. Lo importante es entender qué significan realmente los conceptos fotográficos y sus implicaciones prácticas al hacer fotos. Si se te hace pesado algún desarrollo matemático saltatelo y ve directamente a donde lo usamos.

Las expresiones que obtenemos a lo largo del libro te servirán para entender por fin cosas como ¿qué significa de verdad la distancia focal de un objetivo?, ¿por qué un objetivo se extiende cuando enfoco cerca y otro no?, ¿por qué cuando enfoco más cerca cambia el ángulo de visión?, ¿por qué lo llaman objetivo de 100 mm cuando solo tiene esa distancia focal al enfocar a infinito?, ¿qué significa realmente el número f ?, ¿qué hace realmente un parasol, por qué tiene esa forma?, ¿cómo funciona el autofocus?, ...

Todas estas dudas y muchas más las resolvemos en el libro. Pero el libro no lo cubre todo. Este volumen ya es suficientemente largo y denso de leer para incluir más. Si alguna vez ve la luz un nuevo volumen en esta serie de libros, lo dedicaremos a explicar cómo se mide la nitidez de un objetivo y cómo interactúa con la resolución de un sensor. Pero esa es otra historia. Y para llegar a ella antes hay que entender lo que se explica en este libro que estás leyendo.

Material extra

Algunas cosas son más fáciles de explicar en formato multimedia que texto y además mucho más divertido. Por eso mi intención es acompañar el libro de videotutoriales tanto para facilitar la comprensión de algún concepto como para hacer experimentos con objetivos reales. Los vídeos los publico en mi canal de Youtube fotoigual.

Conocimientos previos

Este libro es autocontenido, pero es aconsejable haber leído antes el libro:

Fundamentos Ópticos, Profundidad de Campo y Distancia Hiperfocal

Disponible en <https://www.amazon.es/dp/B077C9ZZXY>

o al menos tener los conocimientos ópticos básicos del modelo de lente delgada.

Índice general

Resumen	III
Índice general	XIII
1 Introducción	1
1.1 La dura vida de un objetivo	2
1.2 Lentes esféricas	5
1.2.1 Especificación de una superficie esférica	6
1.2.2 Fujinon XF 16 mm F1.4 R WR	11
1.3 Lentes asféricas	20
1.3.1 Especificación de superficies asféricas	21
1.3.2 Canon RF 50 mm f/1.2	22
1.4 Formación de la imagen	25
1.4.1 Ángulo de visión	29
1.4.2 Diafragma	31
1.4.3 Ley de Snell	32
1.5 Propiedades ópticas de los materiales	35

2	Trazado de rayos	44
2.1	Introducción al trazado de rayos.	45
2.2	Datos del objeto a fotografiar y definición de los rayos de entrada	48
2.2.1	Objetos sobre el eje	50
2.2.2	Objetos fuera del eje	51
2.2.3	Número de rayos	54
2.3	Trazado de un rayo	55
2.3.1	Refracción de un rayo en una superficie esférica	56
2.3.2	Traslación del rayo hasta la siguiente superficie	60
2.4	Obtención de la imagen	62
2.5	Ejemplo de obtención de la imagen mediante trazado de rayos	63
2.5.1	Descripción del objetivo	63
2.5.2	Caso 1: objeto axial en el infinito	67
2.5.3	Caso 2: objeto no axial en el infinito.	73
2.5.4	Ángulo de visión y distancia focal	74
2.6	¿Y ahora qué?.	76
2.7	Región paraxial: optica gaussiana o de primer orden	79
2.8	Trazado de rayos paraxiales.	83
2.9	Ejemplo de obtención de la imagen mediante trazado de rayos paraxiales	90
2.10	Distancia focal.	92
2.11	Objetivo ideal	95
2.11.1	Aberraciones	96
3	Lente gruesa	100
3.1	Introducción	101
3.2	Análisis paraxial para una superficie esférica	103
3.2.1	Superficie esférica convexa	105
3.2.2	Superficie esférica cóncava.	108

3.3	Lente gruesa: puntos cardinales	111
3.3.1	Planos principales	112
3.3.2	Distancia focal de una lente	115
3.3.3	Cálculo analítico de los planos principales de una lente	119
3.3.4	Puntos nodales	122
3.4	Cálculo geométrico de la imagen en una lente gruesa	123
3.5	Lentes convergentes y divergentes	126
3.5.1	Ejemplos	129
3.6	Combinación de dos lentes	136
3.7	Modelo de lente gruesa de un objetivo	141
3.8	Puntos cardinales de un objetivo	141
3.8.1	Canon RF 50 mm F1.2 L USM	145
3.9	Ecuación de la lente gruesa	148
3.10	Distancia de enfoque y tamaño de la imagen	155
3.10.1	Distancia en la zona objeto	157
3.10.2	Distancia en la zona imagen	160
3.10.3	Distancia entre planos principales	163
3.10.4	Cálculo aproximado de la distancia de enfoque	163
3.11	Distancia mínima de enfoque	164
3.11.1	Canon RF 50 mm F1.2 L USM	167
4	Enfoque	169
4.1	Introducción	169
4.2	Enfoque por extensión	171
4.2.1	Nikon AF Nikkor 35mm F2 D	174
4.3	Enfoque por desplazamiento interno	181
4.3.1	Canon RF 50 mm F1.2 L USM	183
4.3.2	Fujinon XF 16mm F1.4 R WR	188
4.4	Enfoque cambiando la distancia focal	195
4.4.1	Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM	197

4.5	Objetivos zoom	203
4.5.1	Sony FE 70-200 mm F2,8 GM OSS	204
4.5.2	Nikon Nikkor Z 70-200mm f/2.8 VR	207
4.6	Autofocus.	210
4.6.1	Enfoque por detección de fase	214
4.6.2	Enfoque por detección de contraste	223
4.6.3	Enfoque híbrido	229
4.7	Estabilización de la imagen	231
5	Diafragma, pupilas, sensor y ángulo de visión	236
5.1	Introducción	237
5.2	Diafragma	240
5.3	Pupilas	247
5.3.1	Pupila de entrada	248
5.3.2	Pupila de salida	252
5.4	Pupilas y planos principales.	256
5.4.1	Leica Summicron-M 50 mm f/2	261
5.4.2	Canon RF 50 mm F1.2 L USM	264
5.4.3	Canon EF 17-40 mm f/4 L USM	268
5.5	Diseño retrofocus y telefoto	271
5.6	Pupilas, distancia focal y distancia de enfoque	274
5.7	Ángulo de visión	276
5.8	Ángulo de visión, distancia de enfoque y pupilas	284
5.8.1	Nikon AF-Nikkor 35mm F2 D	293
5.8.2	Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM.	295
5.8.3	Focus breathing.	300
5.9	Exposición y diafragma.	303
5.9.1	Número f	303
5.9.2	Número f efectivo	308
5.9.3	Apertura numérica	313

5.10	Viñeteo	317
5.10.1	Viñeteo natural	318
5.10.2	Viñeteo óptico	321
5.10.3	Nikon AF-Nikkor 35-70mm F3.3/4.5	325
5.10.4	Viñeteo mecánico	335
5.11	Reflejos y parasol	339
5.12	Profundidad de campo	345
5.13	Bokeh	354
A	Apéndice	358
A.1	Ecuaciones de trazado de rayos meridionales	358
A.1.1	Método Lu: refracción en una superficie esférica	358
A.1.2	Método Lu: transferencia de rayos entre superficies	364
A.1.3	Método Qu: refracción en una superficie esférica	366
A.2	Ecuación de la lente gruesa	370

Capítulo 1

Introducción

El objetivo de un objetivo es hacer converger sobre un punto en el sensor todos los rayos provenientes del punto objeto fotografiado. Para ello, el objetivo se compone de un conjunto de lentes que van desviando los rayos hasta conseguir que converjan sobre el sensor. En este capítulo explicamos las formas que pueden tener las superficies de dichas lentes, y cómo se puede reconstruir el diseño de un objetivo si se tienen sus datos. El capítulo introduce algunos temas que serán estudiados en profundidad a lo largo del libro: formación de la imagen, trazado de rayos, ángulo de visión y diafragma. En el fondo todo se fundamenta en un único principio: la desviación que sufre un rayo de luz cada vez que cambia de medio (ley de Snell).

1.1 La dura vida de un objetivo

La misión de un objetivo fotográfico es tan sencilla de explicar como difícil de conseguir en el mundo real: se trata de hacer converger todos los rayos de luz provenientes de un punto de la realidad en un único punto sobre el sensor.

¿Y tan difícil es de conseguir? Pues viendo la cantidad de lentes que tiene un objetivo de gama alta debe serlo (al menos si eres exigente con lo que entiendes por nitidez).

Por ejemplo, en la **figura 1.1** tenemos el esquema del objetivo Sony FE 12-24mm F2.8 GM, lanzado al mercado en 2020 por el módico precio de unos tres mil y pico euros (la principal utilidad de los libros es que nos permiten viajar a otros mundos donde todo es posible, por ejemplo ser mosquetero o tener este objetivo; la gente que no lee no sabe lo que se pierde).

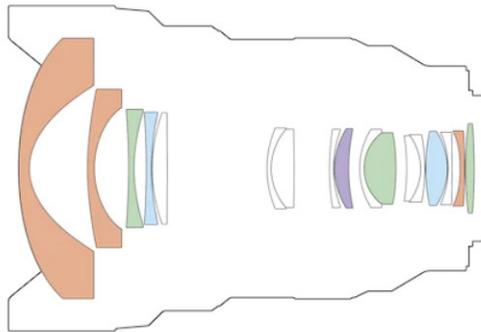


Figura 1.1: Diseño del objetivo Sony FE 12-24mm F2.8 GM. Web de Sony <https://www.sony.es/electronics/camaras-objetivos/se11224gm>.

Es un zoom ultra gran angular (focales entre 12 y 24 mm), muy luminoso (gran apertura $f/2.8$) de altas prestaciones, ideal para paisajes e interiores con baja iluminación.

Pero, en última instancia, centrándonos en sus propiedades ópticas, no deja de ser un conjunto de lentes con unas formas dadas (la mayoría esféricas), cada una de un material el que sea, de un grosor determinado, separadas una cierta distancia, todas ellas alineadas entorno a un eje de rotación.

En cuanto a la distancia de separación entre lentes, vemos que hay algunas que están juntas (no hay hueco entre ellas en el eje horizontal) e incluso en algunos casos la superficie trasera de una lente tiene la misma forma que la superficie delantera de la siguiente lente, es decir, están literalmente pegadas (se llaman lentes cementadas a aquéllas que comparten una superficie).

En las especificaciones técnicas nos dicen que tiene 17 lentes (puedes comprobarlo contándolas en la figura), agrupadas en 14 grupos (un grupo es un conjunto de lentes que se mueven juntas, por ejemplo al hacer zoom). Las lentes 1,2, 9 y 16 tienen superficies asféricas. El resto son esféricas. Las lentes 3, 4, 11, 14 y 17 son de baja dispersión. En breve veremos qué significan estas cosas.

El ángulo de visión diagonal para un sensor full frame (24 x 36 mm) abarca desde 84° para focal 24 mm hasta 122° para 12 mm. El diafragma va de $f/2.8$ a $f/22$ para todas las focales. La distancia de enfoque mínima es 28 cm y la magnificación máxima 0.14x, es decir, la imagen de un objeto que mide 1 m en la realidad y está a 28 cm del sensor tendrá un tamaño de 14 cm en el sensor. El parasol tiene forma de pétalo. Al finalizar el libro sabrás de verdad lo que significan todas estas descripciones técnicas.

Todos los centros de curvatura de las superficies esféricas y los ejes de simetría de las superficies asféricas están en una misma línea, que se llama eje óptico (el eje horizontal). El objetivo tiene simetría rotacional respecto a este eje. Si hacemos un corte meridional (cualquier plano que incluya el eje) del objetivo se obtiene la **figura 1.1**.

Un objetivo de gama alta como éste tiene que garantizar máxima calidad en muy diferentes circunstancias. Tiene que ser capaz de obtener una imagen lo más nítida posible tanto para enfoques muy cercanos, por ejemplo a 50 cm (todos los objetivos tienen una distancia mínima de enfoque, en este caso 28 cm), como para enfoques muy lejanos, por ejemplo las estrellas. Tiene que conseguirlo para todo el rango de distancias focales especificadas (entre 12 y 24 mm).

Además tiene que cumplirse tanto para objetos que formen un ángulo pequeño con el eje del objetivo (el centro de la imagen) como para los objetos cercanos al ángulo máximo de visión (en las esquinas del sensor). También tiene que conseguirlo en situaciones de baja luminosidad, es decir, cuando el diafragma esté abierto al máximo $f/2.8$ y por tanto los rayos que entren formen un haz más ancho y sea más difícil hacerlos converger.

Y por si no fuera poco, también debe hacerlo para todos los colores, es decir, si un objeto es blanco (una estrella blanca puntual), queremos que la imagen sea un punto blanco, no una estrella con un halo de color alrededor (no vale que la componente roja acabe en un píxel y la azul en otro, por ejemplo).

Por último, que no tenga problemas de reflexiones internas indeseadas que produzcan destellos o imágenes fantasma en el sensor, y ya, puestos a pedir, que produzca un bokeh agradable a la vista (que el fondo desenfocado sea uniforme y suave, sin cambios bruscos ni en la forma ni en el brillo).

Al margen de las propiedades ópticas, el objetivo debe ser robusto mecánicamente hablando, fiable y con un enfoque rápido.

Obviamente, cuanto más exigentes sean las medidas de calidad pedidas al objetivo en cada una de estas variables, más complejo será su diseño y fabricación (y más costoso).

Tampoco pienses que es imposible conseguir objetivos de alta calidad con diseños más sencillos ni que hace falta arruinarse para tener un objetivo excelente; todo depende de la funcionalidad del objetivo, para qué tipo de fotos se va a usar. Por ejemplo, los típicos objetivos de focal fija de 50 mm para retratos consiguen una gran nitidez y luminosidad con diseños más sencillos y a precios asequibles.

Así pues, la vida de un objetivo fotográfico puede ser muy dura si empezamos a exigirle muchas cosas. A medida que empieces a rebajar las expectativas, las cosas se irán simplificando y abaratando. Por ejemplo, puedes decir que solo te preocupa que tenga un mínimo de calidad cuando enfoca a infinito o que tenga un diafragma fijo (un caso típico en las desaparecidas cámaras compactas de bolsillo o la mayoría de móviles). Para que te hagas una idea comparativa entre los objetivos que estudia este libro (cámaras réflex y sin espejo) y la cámara que lleva un teléfono móvil, un móvil de gama alta del 2022 puede llevar tres lentes de focal fija: un gran angular (equivalente a un 12 mm en full frame) con $f/2.4$, un angular (equivalente 24 mm) con $f/1.6$ y un tele (equivalente 70 mm) con $f/2.0$.

Lo bueno es que lo que vas a aprender en este libro te sirve para ahora y para dentro de X años cuando algún otro dispositivo sustituya a la cámara del móvil para hacer fotos (porque ese día llegará). Mientras la luz siga siendo luz, todo lo explicado en este libro seguirá valiendo. Simplemente tendrás que aplicarlo al nuevo sistema óptico que inventen.

1.2 Lentes esféricas

Los objetivos se componen de múltiples lentes, cada una con una forma, anchura y material determinado. Cada lente tiene dos superficies. La mayoría de objetivos tienen lentes con formas esféricas porque su fabricación es muy sencilla y económica.

1.2.1 Especificación de una superficie esférica

Una superficie esférica es muy fácil de modelar; tan solo necesitamos conocer su centro C y radio R . La ecuación de una esfera de radio R centrada en el punto C con coordenadas $C(x_0, y_0, z_0)$ es:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2 \quad (1.1)$$

En la [figura 1.2](#) hemos dibujado dos esferas. Una tiene radio $R_1 = 2$ y el centro en $C_1(x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 4)$. La otra tiene el mismo radio $R_2 = 2$ pero el centro en $C_2(x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = 2)$. La intersección define la lente.

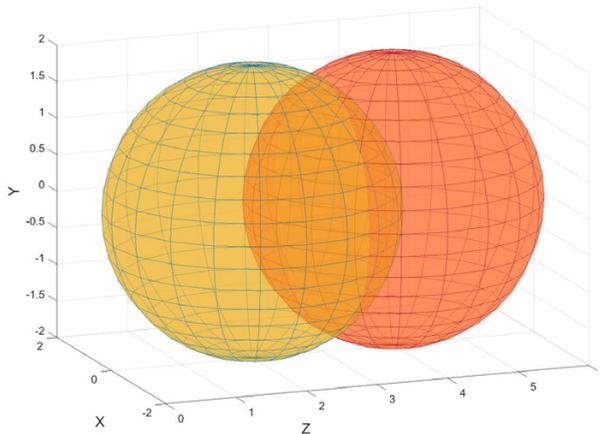


Figura 1.2: Esferas centradas en $(x = 0, y = 0, z = 2)$ y $(x = 0, y = 0, z = 4)$ con radio $R = 2$. La intersección es la lente.

El eje z es el eje óptico, es decir, todas las esferas tienen el centro sobre la línea $x = 0, y = 0$ y lo único que cambia es su coordenada z . Como hay simetría rotacional respecto al eje óptico z , basta con dibujar una sección meridional de la esfera. Por simplicidad, elegimos el corte para $x = 0$.

El resultado son los dos círculos de la [figura 1.3](#) y su intersección la lente.

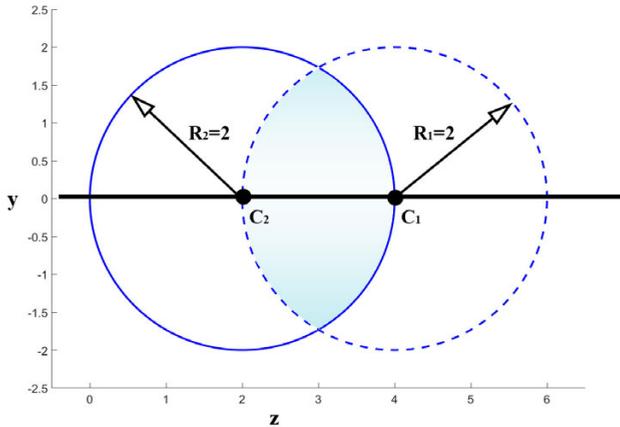


Figura 1.3: Lente biconvexa simétrica con $R_1 = 2$, $R_2 = 2$.

Como antes, el eje vertical y es la altura de la lente y el eje horizontal z el eje óptico. En línea discontinua la esfera 1 con centro en $C_1 = 4$, y en línea continua la esfera 2 con centro en $C_2 = 2$. El subíndice de la esfera indica el orden de la superficie en la lente; por ejemplo, R_1 es el radio de la primera superficie y C_1 su centro.

Cambiando los valores de los centros y los radios, se puede obtener cualquier lente con las superficies deseadas.

Por ejemplo, en la [figura 1.4](#) hemos cambiado el radio de la segunda esfera (línea continua) a $R_2 = 3$. El resultado es una lente que ya no tiene la misma curvatura en ambas superficies. La segunda superficie, la trasera, es menos curva, con lo que desviará menos los rayos.

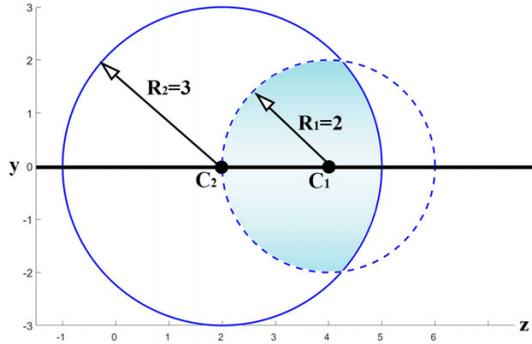


Figura 1.4: Lente biconvexa no simétrica con radios $R_1 = 2$, $R_2 = 3$.

Con los mismos valores que en la [figura 1.4](#) pero simplemente intercambiando el orden de las esferas, obtenemos la lente de la [figura 1.5](#).

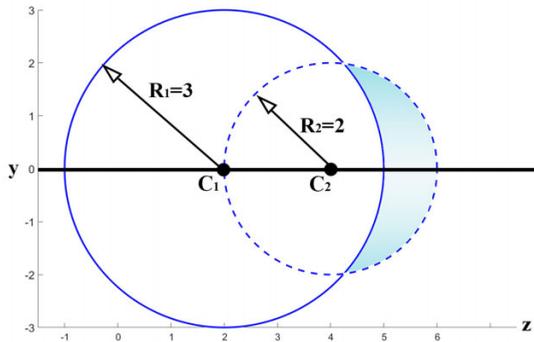


Figura 1.5: Lente menisco convergente de radio $R_1 = 3$, $R_2 = 2$.

Así que es muy importante especificar qué esfera es responsable de cada superficie para evitar malentendidos. Esto ocurre porque cada esfera corta en dos puntos el eje óptico (eje horizontal). Así que hay que especificar cuál es el que realmente forma parte de la lente.

Se llama vértice V a dicho punto (el punto donde una superficie de la lente corta el eje óptico). Marcando el vértice ya no hay dudas.

Además, se define el grosor t de la lente como la distancia entre vértices (la anchura de la lente medida en el eje óptico), $t = V_2 - V_1$.

Por ejemplo, en la **figura 1.6** hemos añadido los vértices $V_1 = 5$, $V_2 = 6$ de la lente de la **figura 1.5**. El grosor de la lente es $t = V_2 - V_1 = 6 - 5 = 1$.

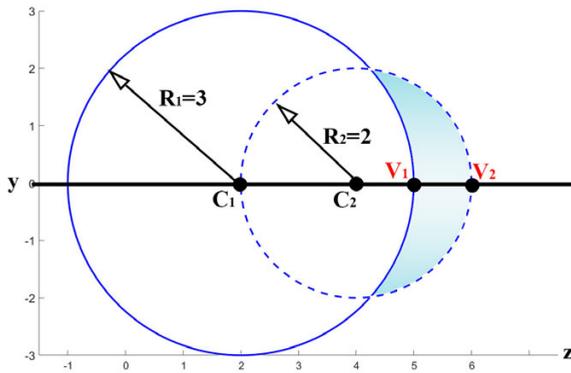


Figura 1.6: Vértices y grosor de la lente.

La forma de especificar los vértices matemáticamente es poniendo un signo al radio.

El vértice sirve de origen de coordenadas; es decir, las distancias se miden respecto a V . Si el centro de la esfera está a la derecha del vértice, el radio es positivo; si está a la izquierda, el radio es negativo.

La [figura 1.7](#) muestra gráficamente el criterio de signos del radio.

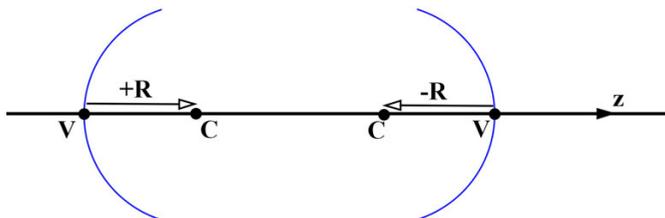


Figura 1.7: Signo del radio: positivo (negativo) si el centro está a la derecha (izquierda) del vértice.

Por ejemplo, en la [figura 1.6](#), como ambos centros de las esferas están a la izquierda de sus respectivos vértices, $R_1 = \overline{V_1C_1} = -3$, $R_2 = \overline{V_2C_2} = -2$. Puedes comprobar tú mismo viendo los ejemplos anteriores que para la [figura 1.3](#), $R_1 = 2$, $R_2 = -2$, y para la [figura 1.4](#), $R_1 = 2$, $R_2 = -3$.

Estos ejemplos ilustran cómo se puede obtener una lente con dos superficies esféricas. Pero un objetivo se compone de muchas lentes y, por tanto, de muchas superficies.

En el mundo real, lo que se hace es definir las superficies del objetivo especificando el radio de cada una de ellas R_i (ojo, ¡con el signo correcto!) y la distancia $t_{i,i+1}$ entre su vértice V_i y el de la siguiente superficie V_{i+1} :

$$t_{i,i+1} = V_{i+1} - V_i \quad (1.2)$$

1.2.2 Fujinon XF 16 mm F1.4 R WR

Veamos un ejemplo real. En la [figura 1.8](#) tenemos el diseño del objetivo Fujinon XF 16 mm F1.4 R WR de Fuji.

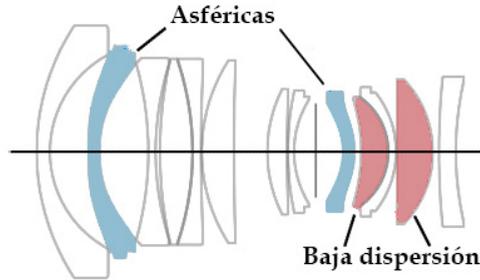


Figura 1.8: Diseño del objetivo Fujinon XF16mm F1.4 R WR. Disponible en <https://fujifilm-x.com/global/products/lenses/xf16mmf14-r-wr/>.

Tiene 13 elementos en 11 grupos. Todas las lentes son esféricas menos dos, que son asféricas; en la [sección 1.3](#) veremos en qué se diferencian y su uso. Además tiene dos lentes de baja dispersión (en nomenclatura de Fuji son lentes ED, dispersión extra baja); en la [sección 1.5](#) explicaremos qué significa eso.

Para simplificar el estudio de este objetivo, vamos a quedarnos con las seis primeras lentes. En la [figura 1.9](#) las hemos nombrado A, B, C, D, E y F. Hemos numerado también las primeras once superficies (vértices 1 hasta 11).

Lo primero que llama la atención es que para definir seis lentes (A,B,C,D,E,F) necesitamos 11 superficies en vez de 12; ¿no debería haber dos superficies por cada lente? Cada lente tiene dos superficies, la frontal y la trasera, pero puede que la superficie trasera de una lente coincida con la frontal de la lente siguiente; en ese caso las lentes se dice que están cementadas (literalmente pegadas).

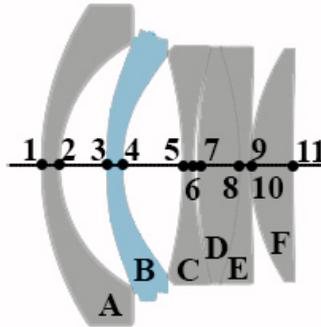


Figura 1.9: Fujinon XF16mm F1.4 R WR.

Eso es lo que ocurre en este objetivo con las lentes D y E. La superficie trasera de la lente D y la delantera de la lente E es la misma, la que tiene el número 8 en la figura. Por consiguiente, bastan 11 superficies para definir las seis primeras lentes de este objetivo pues hay una que comparten.

Hay otro par de lentes, la E y la F, que parecen pegadas (no se ve separación en el eje óptico entre ellas, es decir, los vértices son iguales $V_9 = V_{10}$), pero no tienen la misma forma ya que no tienen el mismo radio, $R_9 \neq R_{10}$. Es decir, están juntas pero no cementadas. Por eso la superficie trasera de la lente E tiene el número 9 y la delantera de la lente F tiene el número 10 (son superficies diferentes).

Las lentes C y D están muy juntas, casi cementadas, pero realmente hay un pequeño hueco entre ellas casi inapreciable en la figura, con lo que tienen vértices y superficies diferentes.

En todas las superficies excepto la 8, el rayo pasa o bien del aire al vidrio si es la superficie frontal de la lente correspondiente, o bien del vidrio al aire si es la superficie trasera. En la interfaz de la superficie 8, el rayo pasa de vidrio a vidrio (como cada vidrio

está hecho de un material diferente, el rayo también se desviará al atravesar esta superficie).

Las superficies 9 y 11 parecen casi planas, lo que significa que tienen un radio de curvatura muy grande, $R_9 \gg 1$, $R_{11} \gg 1$. Una superficie plana perfecta se puede modelar como una superficie esférica con radio infinito $R = \infty$.

En este libro no nos conformamos con el dibujo de un objetivo sacado de la web del fabricante. Queremos ser capaces de reproducir su diseño para poder ir más allá en su estudio. Y ahora viene lo mejor: algunos fabricantes tienen la costumbre de patentar sus objetivos. No hay más que localizar dicha patente en las webs de las oficinas de patentes de EEUU o Japón y ... voilà, tenemos los valores numéricos exactos de los radios y distancias entre superficies del objetivo en cuestión.

Aunque nunca hay garantía que las patentes acaben convirtiéndose en objetivos comerciales reales, lo cierto es que cuando el dibujo de una patente coincide con el de la página web del fabricante la cosa pinta bien.

Afortunadamente, hoy día es posible obtener esa información para algunos objetivos gracias al trabajo de algunas personas que rastrean las webs de patentes y fabricantes. Nosotros usaremos a lo largo del libro la información disponible en la extraordinaria web de Bill Claff photonstophotos.net, que indica el número de patente para multitud de objetivos comerciales.

Para el caso del Fujinon XF 16mm F1.4 R WR, la patente americana tiene número US10018811, fecha julio del 2018, solicitante Fujifilm, inventores Hiroki y Suzuki. Todo muy japonés como ves.

Los radios y distancias entre vértices para las once primeras superficies (seis lentes) están en la [tabla 1.1](#). Las unidades son mm.

Superficie k	Radio R_k	Distancia $t_{k,k+1}$	Vértice V_k
1	38	2.2	0
2	18	6.46	2.2
3	101	1.8	8.66
4	24	8.16	10.46
5	-54	1.2	18.62
6	48	0.75	19.82
7	70	5.44	20.57
8	-47	1.38	26.01
9	269	0.14	27.39
10	28	5.35	27.53
11	424		32.88

Tabla 1.1: Dimensiones de las once primeras superficies (seis lentes) en mm.

Vamos a comprobar si los valores de la tabla sacados de la patente son coherentes con el dibujo de las lentes A,B,C,D,E,F de la [figura 1.9](#) sacada de la web de Fuji.

- Radio

En cuanto al signo, según la tabla, todos los radios son positivos excepto para las superficies 5 y 8. Recuerda que un radio positivo significa que el centro está a la derecha del vértice y negativo a la izquierda. Si observas la [figura 1.9](#) verás que solo las superficies 5 y 8 tienen el centro a la izquierda del vértice, con lo que tienen radios negativos. El resto tienen radio positivo. Así que los signos de la tabla coinciden con el dibujo.

En cuanto a los valores, en el dibujo vemos que la superficie delantera de la primera lente (superficie 1 en la figura) tiene menos curvatura que su superficie trasera (superficie 2). Si vemos los valores de la tabla, se cumple que la superficie 2 tiene un radio más pequeño que la superficie 1: $R_1 = 38 > R_2 = 18$ mm.

Otro ejemplo. La superficie 9 correspondiente a la superficie trasera de la lente E es casi plana en el dibujo. En la tabla tiene un valor alto $R_9 = 269$ mm. La superficie 11 también parece plana en el dibujo, por eso el radio es muy alto $R_{11} = 424$ mm.

En resumen, los valores de los radios de la patente coinciden con los del dibujo del objetivo comercial.

■ Distancia

La columna Distancia ($t_{k,k+1}$) en la tabla indica la distancia t entre la superficie k y la siguiente $k+1$. Como todos los centros están alineados sobre el eje óptico z , la distancia se mide sobre dicho eje. Por ejemplo, el primer valor $t_{1,2} = 2.2$ mm significa que la distancia entre los vértices de las dos primeras superficies vale $t_{1,2} = V_2 - V_1 = 2.2$ mm.

En la tabla vemos que $t_{1,2} = 2.2$ mm es aproximadamente un tercio de $t_{2,3} = 6.46$ mm. Las proporciones coinciden con las del dibujo. Según la tabla, las superficies 9 y 10 están muy juntas $t_{9,10} = V_{10} - V_9 = 0.14$ mm, pero separadas. La distancia es tan pequeña, que en el dibujo parece que estén pegadas. Es la ventaja de usar los datos exactos de la tabla en vez de un dibujo aproximado. Otras superficies que están muy juntas en la figura y que los valores de la tabla confirman son la 5, 6 y 7: $t_{5,6} = V_6 - V_5 = 1.2$, $t_{6,7} = V_7 - V_6 = 0.75$ mm.

■ Vértice

Como los valores $t_{k,k+1}$ nos dan distancias relativas entre superficies y no coordenadas absolutas, para conocer la posición real del vértice necesitamos una referencia. Lo habitual es hacer coincidir el origen de coordenadas $z = 0$ con el vértice de la primera superficie, es decir $V_1 = 0$. De esta forma, $V_2 = V_1 + t_{1,2} = 0 + 2.2 = 2.2$ mm y en general para una superficie i cualquiera, $V_i = t_{1,2} + t_{2,3} + \dots + t_{i-1,i}$.

Es decir, para conocer el vértice de una superficie cualquiera basta con ir sumando todas las distancias previas entre superficies hasta la que nos interesa.

En resumen, aunque los valores de la tabla los hemos obtenido de una patente sin ninguna garantía de ser los que usa Fuji en los objetivos realmente fabricados cuyo diseño es el de la [figura 1.9](#) según la propia web de Fuji, lo cierto es que al menos los valores de la tabla encajan con el dibujo.

Una vez hemos comprobado que los valores de la tabla tienen sentido, vamos a ver si somos capaces de generar nuestra propia figura del diseño del objetivo. Es decir, vamos a reproducir la [figura 1.9](#) a partir de los datos de la tabla (para las seis primeras lentes del objetivo).

Para ello partimos de la ecuación de una esfera de radio R , con centro en $(x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = R)$:

$$x^2 + y^2 + (z - R)^2 = R^2 \quad (1.3)$$

Como hay simetría, basta con dibujar una sección de la esfera que pase por su centro, por ejemplo el plano $x = 0$ tal y como hemos hecho en las figuras de la sección anterior. De esta forma, la [Ecuación 1.3](#) queda como la ecuación de un círculo de centro $(y_0 = 0, z_0 = R)$ y radio R :

$$z = \frac{1}{2R}(y^2 + z^2) \quad (1.4)$$

Al tener el centro en $z_0 = R$ y radio R , el vértice está en $z = 0$. Por tanto, coincide con el caso que acabamos de ver con el vértice de la primera superficie en el origen $V_1 = 0$.

Si sustituyéramos en la **Ecuación 1.4** el radio $R = R_1$ tendríamos la ecuación de la primera superficie del objetivo. Como vemos en la **figura 1.8**, dicha superficie (y casi todas las de cualquier objetivo) tiene un radio mucho mayor que su altura, o en términos matemáticos $z \ll y$.

Con esta hipótesis, la **Ecuación 1.4** se simplifica pues $y^2 + z^2 \simeq y^2$, quedando la ecuación de una parábola:

$$z = \frac{1}{2R}y^2 \quad (1.5)$$

La **Ecuación 1.5** tiene un problema: solo es válida para una superficie de radio R centrada en $z = R$, es decir, con vértice en $z = 0$. Por tanto, nos sirve tan solo para la primera superficie que es la que tiene el vértice en el origen $V_1 = 0$. Para el resto de superficies hay que reformular la ecuación colocando el vértice donde toca. Por ejemplo, para la segunda superficie, el vértice debe estar en $V_2 = V_1 + t_{1,2} = 2.2$ mm como ya vimos.

Para el caso de una superficie k cualquiera, la expresión queda:

$$z = \frac{1}{2R_k}y^2 + V_k \quad (1.6)$$

donde R_k es su radio y V_k su vértice, que ya vimos que se obtiene sumando las distancias entre las superficies previas hasta la k -ésima actual. Por ejemplo, $V_5 = V_1 + t_{1,2} + t_{2,3} + t_{3,4} + t_{4,5} = 18.62$ mm (ver valores exactos en la **tabla 1.1**).

En la [figura 1.10](#) dibujamos superpuesto el dibujo del objetivo de la web de Fuji con las superficies obtenidas con nuestro modelo de la [Ecuación 1.6](#) usando los datos de la [tabla 1.1](#) para el rango de alturas $-20 < y < 20$ mm y distancias sobre el eje óptico $0 < z < 35$ mm.

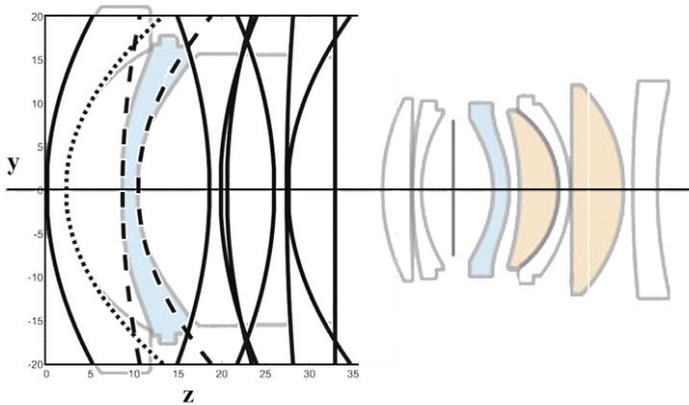


Figura 1.10: Superposición del dibujo de Fuji con nuestra simulación de las 11 primeras superficies del Fujinon XF 16 mm F1.4 R WR.

Al añadir los ejes en mm, lo primero a destacar es que ahora el dibujo de Fuji ya tiene dimensiones físicas reales. Podríamos hasta estimar la longitud total del objetivo si quisiéramos.

¿Cuánto se parece nuestra reproducción al dibujo original del objetivo en la web de Fuji? He dibujado en línea continua en la [figura 1.10](#) las superficies que se ajustan perfectamente a las del objetivo real. Son todas menos la segunda, tercera y cuarta. Para estas tres superficies, nuestra reproducción coincide con las del objetivo para alturas pequeñas, es decir, para la zona cercana al centro. Pero, a medida que nos alejamos del eje, por ejemplo para $|y| > 10$, nuestra aproximación se aleja bastante de la forma real de dichas superficies.

El error entre nuestras superficies y las reales del objetivo se debe a dos causas diferentes.

En el caso de la superficie 2 (la trasera de la primera lente, línea punteada), el error es debido a que la aproximación parabólica no es correcta. Esta superficie tiene un radio que no es suficientemente grande como para aproximar la sección de la esfera por una parábola (la esfera se curva más que la parábola en los extremos).

Así pues, la solución es usar la ecuación exacta de la esfera dada en la **Ecuación 1.4**. Lo único que hay que hacer es expresarla de otra forma; despejando z en función de la altura y , queda:

$$z = \frac{y^2/R}{1 + \sqrt{1 - (y/R)^2}} \quad (1.7)$$

Si usamos la **Ecuación 1.7**, obtenemos la **figura 1.11**, donde la superficie 2 ahora sí coincide perfectamente con la real del objetivo.

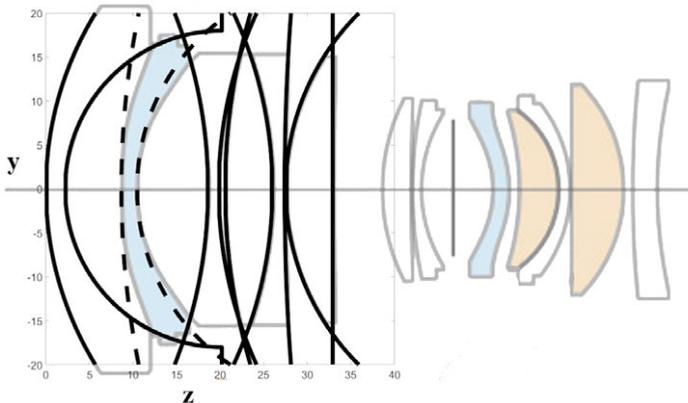


Figura 1.11: Superficies esféricas con la fórmula exacta. El modelo esférico falla para las superficies 3 y 4 porque son asféricas.

Usar la fórmula exacta de la esfera ha resuelto el caso de la superficie 2; pero las superficies 3 y 4 (las que definen la segunda lente del objetivo) siguen teniendo menor curvatura que las reales para alturas alejadas del centro óptico $|y| > 10$. Ni la fórmula exacta de la esfera (figura 1.11) ni su aproximación parabólica (figura 1.10) son capaces de obtener las superficies 3 y 4 correctas.

Si vuelves a ver la figura 1.9, dice que la segunda lente es esférica, es decir, no es esférica. Así que no resulta sorprendente que nuestro modelo de superficies esféricas no funcione con las superficies de esta lente, pues es esférica. ¿Qué es y cómo podemos modelar una lente esférica?

1.3 Lentes esféricas

Las lentes esféricas son comunes en multitud de objetivos, sobre todo los angulares que tienen que tratar con grandes ángulos de visión y curvaturas en sus elementos frontales. Su principal uso es para mejorar la nitidez de la imagen para diafragmas muy abiertos. Además permiten reducir el número de lentes consiguiendo diseños más compactos y ligeros.

Para conseguir un objetivo de la misma calidad sin lentes esféricas haría falta añadir más lentes esféricas, lo cual complicaría el diseño y el peso del objetivo. Además, en algunos casos es simplemente imposible prescindir de las lentes esféricas; por ejemplo, la estrecha profundidad de un teléfono móvil obliga a diseños de lentes de mínimo grosor.

El principal inconveniente de las lentes esféricas es que son más costosas y difíciles de fabricar que una lente esférica tradicional. Por eso, aunque hoy día casi cualquier objetivo ya incluye alguna lente esférica, la mayoría de superficies siguen teniendo forma esférica.

Las superficies esféricas tienen forma esférica en la zona central (zona cercana al eje óptico $y \simeq 0$), pero se alejan de dicha forma a medida que aumenta la altura y (zona periférica de la lente). Veamos cómo modelarlas matemáticamente para poder reproducirlas como hemos hecho con las esféricas.

1.3.1 Especificación de superficies esféricas

Para modelar una superficie esférica partimos de la **Ecuación 1.7** de la esfera. La modificamos introduciendo un factor k que define la esfericidad:

$$z(y) = \frac{y^2/R}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)(y/R)^2}} \quad (1.8)$$

Por ejemplo, para $k = 0$ queda la ecuación de una esfera (la misma fórmula que la **Ecuación 1.7**), $-1 < k < 0$ produce una elipse, $k = -1$ es una parábola (**Ecuación 1.5**) y $k < -1$ una hipérbola. En la **figura 1.12** mostramos algunos ejemplos. Dibujamos la superficie girada 90° para ocupar menos espacio; el eje vertical es el eje óptico z y el horizontal la altura y ; si no lo ves, gira el libro 90° hacia la derecha.

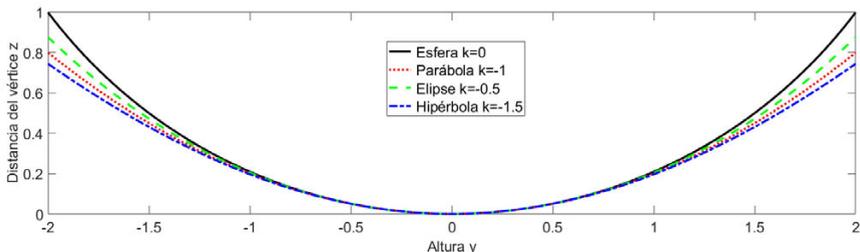


Figura 1.12: Superficies esféricas.

Comprobamos en la figura que, para la zona cercana al centro, $y \simeq 0$, todas tienen la misma forma, y es en los extremos donde más se diferencian.

Por último, a la **Ecuación 1.8** se le añaden unos términos polinómicos que permiten hacer el ajuste fino en los extremos de la superficie:

$$z(y) = \frac{y^2/R}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)(y/R)^2}} + \lambda_3 y^3 + \lambda_4 y^4 + \dots + \lambda_N y^N \quad (1.9)$$

donde los coeficientes λ_i son optimizados para conseguir la calidad deseada en el objetivo.

Para que te hagas una idea del nivel de precisión, en el caso del Fujinon XF 16mm F1.4 R WR de Fuji de la **figura 1.8**, hacen falta al menos $N = 20$ coeficientes para definir la superficie.

Eso significa que hay términos donde hay que elevar la altura y a la vigésima potencia; Obviamente su coeficiente asociado λ_{20} es infinitesimal (del orden de 10^{-23}).

Lo importante es entender que en una superficie esférica tan sólo tenemos un parámetro con el que jugar: el radio. Sin embargo, en una esférica podemos tener más de veinte variables con las que jugar para optimizar el diseño de esa superficie del objetivo.

Esta flexibilidad extra permite diseñar objetivos con mejor calidad a expensas de una mayor complejidad y coste.

1.3.2 Canon RF 50 mm f/1.2

El objetivo Canon RF 50 mm f/1.2 es la versión moderna del típico objetivo para retratos de 50 mm muy luminoso. Tiene tres superficies esféricas. En concreto, vamos a analizar la primera de ellas.

De la patente sacamos los datos de la [tabla 1.2](#).

Radio	80.11
k	0
λ_4	$-1.44652 \cdot 10^{-6}$
λ_6	$-1.02693 \cdot 10^{-9}$
λ_8	$1.91678 \cdot 10^{-12}$
λ_{10}	$-3.07794 \cdot 10^{-15}$
λ_{12}	$2.00476 \cdot 10^{-18}$

Tabla 1.2: Datos de la primera superficie esférica.

El resto de coeficientes λ_i no indicados valen cero.

Observa que todos los coeficientes λ_i de la tabla son muy pequeños. Esto implica que los términos polinómicos $\lambda_i y^i$ en la ecuación de la superficie serán despreciables cerca del centro de la superficie. Como ya dijimos, estos términos sirven para hacer el ajuste fino en los extremos de la superficie, pero el centro siempre tiene forma esférica.

Introduciendo los datos de la tabla en la [Ecuación 1.9](#) obtenemos la ecuación de dicha superficie. Como es muy difícil a simple vista ver las diferencias entre una forma esférica y otra esférica, en vez de dibujarlas superpuestas vamos a dibujar la diferencia entre ellas $\Delta z = z_{asf} - z_{esf}$.

Puesto que en este caso $k = 0$, la diferencia entre la superficie esférica real del objetivo y la superficie esférica del mismo radio viene dada por los términos polinómicos:

$$\Delta z = -1.44652 \cdot 10^{-6} y^4 - 1.02693 \cdot 10^{-9} y^6 + 1.91678 \cdot 10^{-12} y^8 - 3.07794 \cdot 10^{-15} y^{10} + 2.00476 \cdot 10^{-18} y^{12}$$

La **figura 1.13** muestra Δz en función de la distancia al eje óptico y para el rango de alturas $-20 < y < 20$ mm.

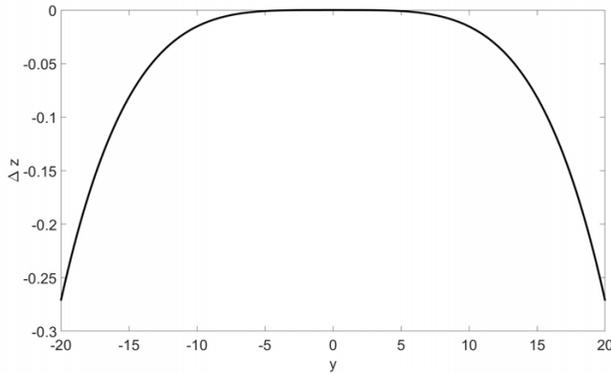


Figura 1.13: Diferencia entre la superficie esférica real y la aproximación esférica
$$\Delta z = z_{asf} - z_{esf}.$$

Comprobamos que en la zona cercana al eje óptico la resta da $\Delta z = 0$, es decir, ambas superficies coinciden para alturas $|y|$ pequeñas. A medida que nos alejamos del centro óptico, o sea, y va aumentando, comienzan a aparecer diferencias, siendo máxima en los extremos (la periferia de la superficie). Observa que el signo es negativo, $\Delta z = z_{asf} - z_{esf} < 0$, así que $z_{asf} < z_{esf}$. Significa que la superficie esférica tiene menos curvatura que la esférica en los extremos. Las dimensiones son mm, así que son diferencias muy pequeñas, 0.25 mm en los extremos, algo inapreciable a simple vista pero de gran relevancia a efectos ópticos.

Gracias a este sutil aplanamiento en los extremos de la superficie, se consigue que los rayos en los extremos (rayos que cortan la superficie a mayor altura y , más alejados del centro) se doblen menos que si fuese esférica, permitiendo obtener una imagen más nítida.

1.4 Formación de la imagen

Conocido cómo modelar las superficies de un objetivo, podemos pasar al siguiente paso: cómo se obtiene la imagen. Antes de estudiar los fundamentos ópticos que hacen posible que un objetivo obtenga una imagen nítida de un objeto, vamos a ver un ejemplo de qué les sucede a los rayos de luz desde que parten del objeto hasta que entran en el objetivo y luego hasta que convergen sobre un punto del sensor formando la imagen.

Para ello vamos a usar de ejemplo el objetivo Zeiss Batis f/2.8 18mm representado en la [figura 1.14](#). Se trata de un objetivo de 11 elementos (puedes contarlos en la figura) organizados en 10 grupos.

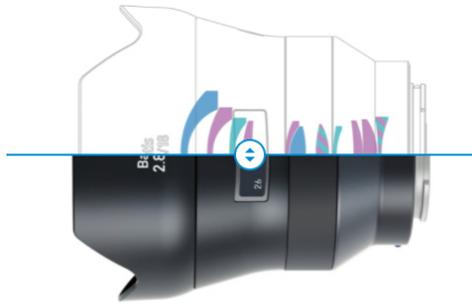


Figura 1.14: Esquema del objetivo Zeiss Batis f/2.8 18mm. Accedido en <https://www.zeiss.com/consumer-products/int/photography/batis/batis-2818.html>

Supondremos que la luz viaja de izquierda a derecha. El objetivo divide el espacio en dos zonas: la zona objeto, donde está el objeto a fotografiar (de donde provienen los rayos, a la izquierda del objetivo), y la zona imagen, donde se forma la imagen que se registra en el sensor (a la derecha del objetivo).

Imaginemos que el objeto fotografiado está situado sobre el eje óptico a una distancia infinita. La luz que emana de ese objeto se propaga en forma de ondas. El frente de ondas creado por ese objeto axial, cuando llega al objetivo, es plano y, por consiguiente, los rayos (piensa en los rayos como líneas perpendiculares donde cortan al frente de ondas) inciden paralelos al eje (ver [figura 1.15](#)).

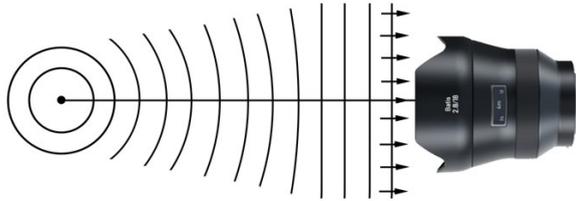


Figura 1.15: Objeto en el eje muy lejano. Los rayos llegan paralelos al eje (frente de ondas plano).

Ajustamos la distancia de enfoque a infinito (ya sea manualmente o con el autofocus) y hacemos la foto. ¿Qué ocurre con los rayos que entran por el objetivo y el diafragma deja pasar? Es decir, ¿dónde acaban incidiendo cada uno de esos rayos en el sensor? ¿cuál es la imagen obtenida?

Hoy día es posible encontrar programas (y algunos gratuitos) que permiten simular el trazado de rayos en dispositivos ópticos. Mejor todavía es poder hacerlo online.

En <https://www.photonstophotographs.net/GeneralTopics/Lenses/OpticalBench/OpticalBenchHub.htm> hay multitud de objetivos analizados.

Abrimos el menú desplegable y seleccionamos el objetivo Zeiss Batis f/2.8 18mm. Se abre una ventana con el diseño del objetivo y le pedimos que nos dibuje los rayos provenientes de un objeto sobre el eje a distancia infinita, es decir, que dibuje la trayectoria de los rayos que entran paralelos al eje óptico.

El resultado está en la **figura 1.16**.

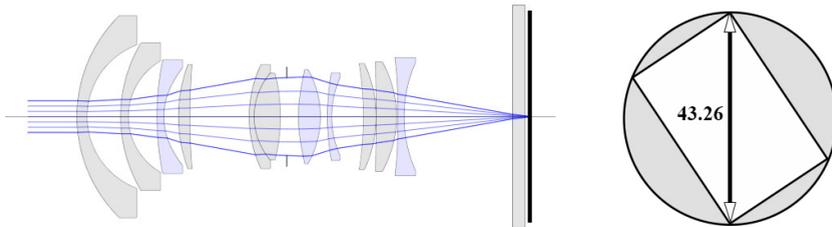


Figura 1.16: Objetivo Zeiss Batis f/2.8 18mm. Izquierda: trayectoria de rayos paralelos al eje (imagen obtenida de <https://www.photonstophotos.net>). Derecha: círculo imagen y sensor full frame.

La parte de la izquierda muestra la trayectoria de unos cuantos rayos incidentes paralelos hasta que convergen en la última línea vertical que representa el sensor. Como vemos, el plano imagen (donde convergen los rayos) coincide con el sensor, con lo que se obtiene una imagen nítida. En el próximo tema veremos cómo trazar dichos rayos. Mientras tanto, en este tema usaremos la web <https://www.photonstophotos.net> para todos los dibujos.

La imagen obtenida por un objetivo es un círculo más o menos grande según las dimensiones del objetivo. A su vez, las dimensiones del objetivo, o sea, el diámetro de cada superficie, se establece en función del tamaño del sensor que vaya a registrar dicha imagen. Por ejemplo, este objetivo se diseñó para lo que entonces se llamaba película de 35 mm y hoy día se conoce como sensor full frame.

Las dimensiones alto \times ancho de un sensor full frame son 24×36 mm. El diámetro del círculo imagen coincide con la diagonal del sensor, que en este caso vale $\sqrt{24^2 + 36^2} = 43.26$ mm. Para verlo más claro, en la derecha de la [figura 1.16](#) se muestra la vista frontal del círculo imagen y el sensor cuya diagonal coincide con el diámetro del círculo imagen.

Si el sensor fuese más pequeño captaría la parte central del círculo imagen. Fíjate que de un círculo grande siempre te puedes quedar con un trozo más pequeño, pero no a la inversa. Por eso si el objetivo está diseñado para un sensor full frame, no pasa nada si lo usas con un sensor APS-C más pequeño; simplemente te estás quedando con la parte central y desechando la zona exterior. Pero si la lente está diseñada para un sensor APS-C con diagonal más pequeña, no puedes usarlo con un sensor más grande pues simplemente el círculo imagen no es tan grande (salvo que hagas como Nikon y Sony que sí dejan hacer fotos con una lente APS-C en un cuerpo full frame pero recortando la zona usada del sensor al tamaño del APS-C).

Si divides el ancho por el alto del sensor se obtiene la relación de aspecto. Por ejemplo, para un sensor full frame $36/24 = 3/2 = 1.5$ (el sensor es 1.5 veces más ancho que alto).

Las cámaras sin espejo y réflex tienen una relación de aspecto 3:2, mientras que los sensores de los móviles son 4:3 (como los televisores y monitores del siglo pasado; los televisores actuales tienen una relación de aspecto 16:9).

Cuanto más apaisado sea el sensor (mayor relación de aspecto), más superficie del círculo imagen se desperdicia. Una forma de conseguir relaciones de aspecto muy grandes en el cine (típicamente 2.39 o más) con película de 35 mm sin desperdiciar círculo imagen es usando lentes anamórficas, que comprimen la dimensión horizontal de la imagen al grabar y luego durante la proyección la reconstruyen, consiguiendo una película en formato superpanorámico.

1.4.1 Ángulo de visión

¿Qué pasa con los rayos que provengan de un objeto que en vez de estar sobre el eje está situado en el límite del campo de visión? Al estar a distancia infinita, los rayos llegarán paralelos como en el caso anterior; la diferencia estará en el ángulo de incidencia.

Al provenir de un objeto ubicado en la esquina de nuestro visor, vendrán formando un ángulo respecto al eje horizontal que coincidirá con la mitad del ángulo de visión (ver [figura 1.17](#)).

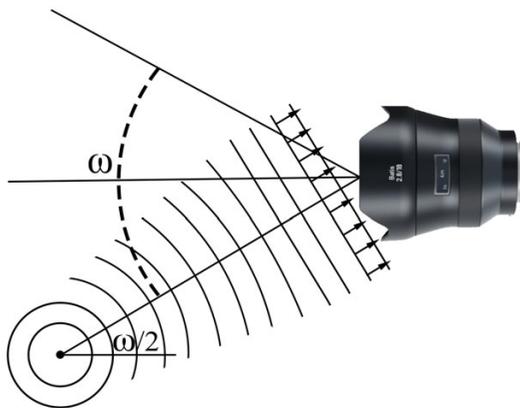


Figura 1.17: Objeto muy lejano en el límite del campo de visión. Los rayos llegan paralelos con un ángulo igual a la mitad del ángulo de visión.

En este caso, como el objetivo es un gran angular (18 mm de focal y un sensor full frame), el ángulo de visión diagonal es grande: $\omega = 99^\circ$ según especificaciones del fabricante.

Por eso su elemento frontal es muy grande, ya que tiene que aceptar rayos de entrada formando un gran ángulo, en concreto de hasta $99/2 = 49.5^\circ$.

En el último capítulo del libro, en la **sección 5.7**, explicaremos en detalle cómo se calcula el ángulo de visión de un objetivo. Allí veremos que no solo depende del tamaño del sensor y de la distancia focal del objetivo, sino de otros factores cuando la distancia de enfoque es pequeña.

En la **figura 1.18** mostramos la trayectoria de dichos rayos, en concreto los que inciden con un ángulo de 49.5° .

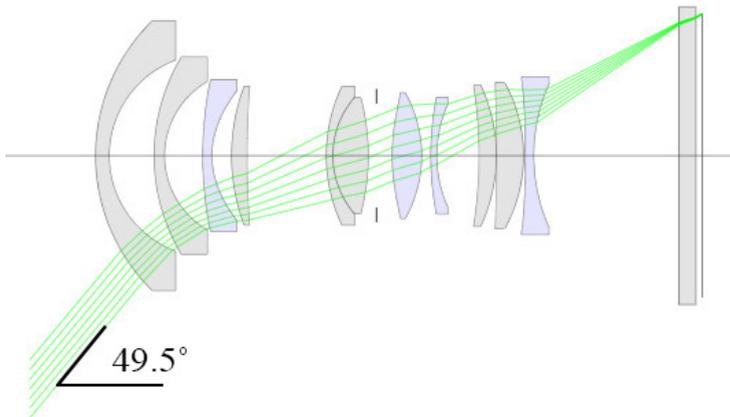


Figura 1.18: Objetivo Zeiss Batis f/2.8 18mm. Trayectoria de rayos con máximo ángulo de visión (imagen obtenida de <https://www.photonstophotos.net>).

De nuevo comprobamos que todos los rayos convergen sobre el sensor. En este caso, convergen en el límite superior del sensor, tal y como era previsible. Observa que la imagen está invertida (el objeto está por debajo del eje luego tiene altura negativa, mientras que la imagen se forma por encima del eje, luego tiene altura positiva).

Además, sabemos que el tamaño de la imagen corresponde con el tamaño de la diagonal de un sensor full frame y el ángulo de visión es 49.5° .

Si usásemos un sensor más pequeño, esos rayos, aun habiendo sido enfocados en el plano imagen, no podríamos registrarlos. Por tanto, el ángulo de visión se reduciría, apareciendo el concepto de distancia focal equivalente que explicamos en el último capítulo del libro.

Recuerda que la realidad es en tres dimensiones, no dos como en las figuras. Como hay simetría respecto al eje óptico, el plano dibujado es un plano de simetría; o sea, si giras dicho plano alrededor del eje horizontal tienes las tres dimensiones. Por eso la línea que representa el sensor corresponde a un diámetro cualquiera del círculo imagen.

1.4.2 Diafragma

El otro elemento que vamos a estudiar en profundidad a lo largo del libro es el diafragma y cómo influye tanto su tamaño como posición dentro de un objetivo. Es el mecanismo que sirve para regular la cantidad de luz que llega al sensor. Es decir, que, de los rayos que entran en el objetivo, incidan más o menos sobre el sensor depende del diafragma usado.

Para el Zeiss Batis $f/2.8$ 18mm, el diafragma está ubicado aproximadamente en medio de la figura (las dos pequeñas líneas perpendiculares al eje, una arriba y otra abajo, que hay en la [figura 1.16](#)). Para verlo más claro, en la [figura 1.19](#) representamos el caso $f/16$ (los casos anteriores correspondían a máxima abertura $f/2.8$).

Comparándola con el caso $f/2.8$ ([figura 1.16](#)), observa cómo el haz de rayos que deja pasar el diafragma es más estrecho, es decir, algunos rayos que pasaban con $f/2.8$ son bloqueados con $f/16$. Esto se traduce en una pérdida de luminosidad en la imagen como bien sabes (diafragmas cerrados, menor exposición).

En el [Capítulo 5](#) del libro explicamos en detalle todo lo relacionado con el diafragma, cómo se mide y cómo afecta a la exposición.

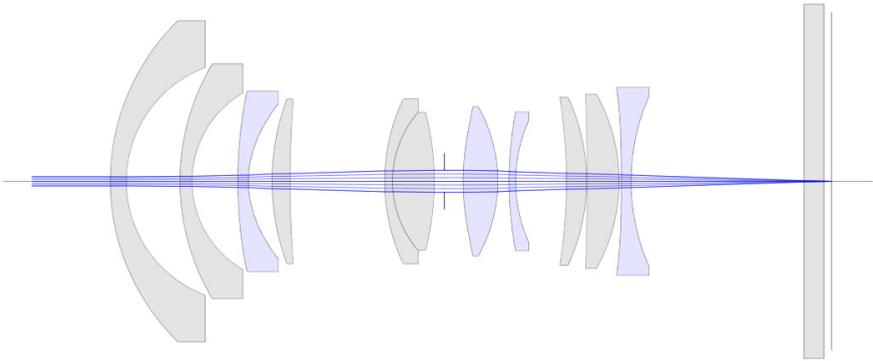


Figura 1.19: Rayos sobre el eje. Diafragma cerrado f/16 (imagen obtenida de <https://www.photonstophotos.net>).

1.4.3 Ley de Snell

¿Cómo podemos saber la trayectoria concreta que sigue un rayo cualquiera desde que incide en el objetivo hasta que llega al sensor?
¿De dónde se sacan las figuras anteriores?

Lo bueno de la Óptica Geométrica (la disciplina que se dedica a estudiar qué le ocurre a los rayos que entran en un objetivo hasta que llegan al sensor) es que se fundamenta en una única ley que conocemos todos desde niños: la ley de Snell, que nos dice que un rayo se desvía al cambiar de medio (por ejemplo, todos hemos visto cómo un palo recto se *dobla* al meterlo en el agua).

El motivo del cambio de dirección de los rayos es que la velocidad de propagación cambia al pasar de un medio a otro. El factor que mide ese cambio de velocidad de propagación se llama índice de refracción n del medio, y se define como el cociente:

$$n = c/v \tag{1.10}$$

donde c es la velocidad en el vacío y v la velocidad en el medio. Para el aire, vale $n = 1$ (el valor exacto incluyendo la atmósfera es $n = 1.0003$), para el agua $n = 1.333$, para el aceite de oliva¹ $n = 1.47$ y para un vidrio típico de un objetivo $n = 1.52$. Cuanto más alto el valor, más lento se propaga la luz y más se dobla el rayo. Para hacer más intuitiva la nomenclatura, se dice que un material con un índice de refracción alto tiene una densidad o potencia óptica alta, queriendo decir que dobla los rayos más que otro con un menor índice de refracción.

Salvo que hagas fotografía submarina, lo normal es que la luz viaje en el aire $n = 1$ hasta que llegue a tu objetivo y allí tenga que atravesar una serie de lentes con diferentes índices de refracción $n_i > 1$ hasta volver definitivamente al aire e impactar sobre el sensor como hemos visto en los ejemplos anteriores.

Las lentes que forman un objetivo fotográfico suelen estar hechas de vidrio.

Cuando un rayo de luz proveniente del objeto fotografiado incide en la superficie frontal de la primera lente, sufre una desviación. Cuando atraviesa la segunda superficie de la primera lente, sufre otra desviación y así sucesivamente hasta que atraviesa todas las lentes y por último incide en el sensor. La misión del objetivo es que todos los rayos provenientes del mismo objeto converjan sobre el mismo punto del sensor, obteniendo una imagen nítida. Este sería el caso de un objetivo ideal.

En la realidad, es difícil hacer converger todos los rayos exactamente sobre el mismo punto del plano imagen, apareciendo las denominadas aberraciones que en la práctica significan una pérdida de nitidez en la imagen final; es decir, que un punto en la realidad se convierta en un círculo en el sensor, apareciendo el concepto de círculo de confusión explicado en el libro de Fundamentos Ópticos.

Todo el tema de aberraciones y cómo medir la resolución o calidad de un objetivo lo dejamos para un libro futuro. En este libro nos centramos en entender qué es un objetivo, cómo funciona y cómo modelarlo.

Se llama interfaz a la superficie que delimita un cambio de medio, es decir, en nuestro caso cada superficie de cada lente es una interfaz. La interfaz puede ser entre aire y vidrio (cuando el rayo entra en una lente), entre vidrio y aire (cuando el rayo sale de la lente) o entre vidrio y vidrio (cuando el rayo pasa de una lente a otra con un índice de refracción diferente).

La ley de Snell (ver [figura 1.20](#)) relaciona el ángulo de incidencia y el de refracción con los índices de refracción de ambos medios:

$$n \operatorname{sen} \alpha = n' \operatorname{sen} \alpha' \quad (1.11)$$

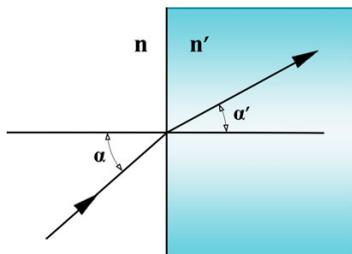


Figura 1.20: Refracción. Ley de Snell.

donde n es el índice de refracción del medio de donde viene el rayo (medio incidente), α el ángulo de incidencia (el ángulo que forma el rayo incidente con la normal a la superficie donde incide), n' el índice de refracción del medio por donde sale el rayo (medio de transmisión), y α' el ángulo de refracción (el ángulo entre el rayo en el nuevo medio y la normal a la superficie).

Según el ángulo que forme el rayo incidente con la normal a dicha superficie en el punto de corte, el rayo se curvará más o menos siguiendo la ley de Snell.

A lo largo del libro usaremos la notación variables sin prima (apóstrofo, coma alta, como quieras llamarlo), por ejemplo n o α , para indicar que estamos en el medio de incidencia (de donde viene el rayo) y variables con prima, por ejemplo n' o α' , para indicar nombres de variables en el medio de transmisión (por donde sale el rayo tras la refracción).

Aunque para aplicar la ley de Snell basta con conocer el índice de refracción del material, las propiedades ópticas de un vidrio abarcan más que su índice de refracción. En la [sección 1.5](#) explicamos en detalle cómo se caracterizan dichos materiales.

Terminado este tema de introducción, es el momento de empezar a estudiar en profundidad qué significa aplicar la ley de Snell a un objetivo real. Para empezar, la mayoría de superficies son esféricas, no planas como en la [figura 1.20](#), lo que va a complicar el cálculo de las trayectorias de los rayos. A cambio, el objetivo va a ser capaz de cumplir su misión: hacer converger los rayos de entrada en un punto sobre el sensor, es decir, obtener una imagen nítida sobre el sensor.

1.5 Propiedades ópticas de los materiales

Puesto que todo gira entorno al concepto de refracción cuando la luz pasa de un medio a otro (del aire al interior de la lente o de la lente al aire de nuevo), es fundamental conocer las propiedades ópticas del material del que está hecha la lente.

Aunque en este libro solo nos centremos en la parte óptica, es importante saber que hay otros muchos aspectos a tener en cuenta. Por ejemplo, la calidad interna (¿hay burbujas? ¿doble refracción?, ¿estrés óptico?), las propiedades químicas (resistencia al clima y agentes químicos: ¿cómo le afecta la humedad o estar en contacto con soluciones alcalinas o ácidas? ¿qué material usar: fosfato, fluorita, borosilicato, ...?), propiedades mecánicas y térmicas (resistencia a impactos, cambios bruscos de temperatura), tolerancias y proceso de fabricación.

Una lente es un medio transparente hecho de vidrio (también puede ser de plástico) y su comportamiento óptico viene determinado principalmente por el valor del índice de refracción para las diferentes longitudes de onda del espectro visible. Los valores nominales dados por el fabricante suelen ser los obtenidos en condiciones normales (en el aire a una presión de 1 atmósfera y una temperatura de 20 grados). Suelen ser valores con un nivel de precisión muy alto (hasta el quinto decimal en el índice de refracción).

Además, interesa que la lente sea lo más homogénea posible (que el índice de refracción no cambie dentro de la lente) y con un valor lo más alto posible de transmitancia (la transmitancia es el porcentaje de luz que atraviesa la lente, es decir, la incidente menos la reflejada).

Conseguir estas propiedades no es sencillo pues requieren un complejo proceso de fabricación (fundido, enfriamiento, selección y mezcla de materiales). Pero eso es un problema tecnológico que los fabricantes ya se encargan de resolver.

Por ejemplo, la marca Schott añade las letras HT o incluso HTultra a sus lentes con alta transmitancia, mientras que la marca CDGM añade el sufijo GT y TT a sus lentes para indicar los mismos conceptos (en breve veremos otro ejemplo sobre cómo traducir a lenguaje técnico nombres comerciales).

En este libro supondremos que todos esos aspectos están optimizados y nos centraremos en analizar cómo influye en la calidad de la imagen el índice de refracción (supondremos solo el rango visible, para diseño de objetivos para fotografía de infrarrojos o ultravioletas habrá que asegurarse que la lente elegida deja pasar dichas longitudes de ondas).

Aunque en fotografía estamos más habituados a usar las longitudes de onda monocromáticas correspondientes a los diferentes colores, por ejemplo el rojo, verde y azul, en la industria del vidrio usan otros valores.

En concreto, usan las llamadas líneas de Fraunhofer (unas líneas oscuras que encontró Fraunhofer en el Sol (luz blanca) debidas a la absorción del elemento correspondiente, por ejemplo el Sodio a 589.2 nm).

La ventaja de usar las líneas de Fraunhofer es que están normalizadas así que no hay confusiones y es fácil hacerse una idea de a qué color corresponden simplemente viendo su valor y usando la siguiente tabla como referencia:

Tabla 1.3: Relación entre colores y longitudes de onda en nm (espectro visible).

Color	Long. de onda λ (nm)
Violeta	380-450
Azul	450-495
Verde	495-570
Amarillo	570-590
Naranja	590-620
Rojo	620-750

Aunque hay muchas líneas de Fraunhofer, en la práctica suele especificarse el índice de refracción tan solo para unas cuantas de ellas.

Por ejemplo, en la [tabla 1.4](#) tenemos la información correspondiente al material N-BK7 del fabricante alemán Schott (puedes obtener información similar de las páginas web de otros gigantes de la industria como Sumita, CDGM, Ohara o Hikari). La N significa que es respetuoso con el medio ambiente (lo cual significa que la versión antigua no lo era; efectivamente, nuestros antiguos objetivos contienen plomo, cadmio y arsénico entre otros elementos poco recomendables), B significa que es un borosilicato (quizás te suene más su nombre comercial Pyrex).

Tabla 1.4: Índices de refracción del cristal N-BK7 de Schott para diferentes líneas de Fraunhofer y su correspondiente longitud de onda en nm.

Línea	λ (nm)	n_r
n_s	852.1	1.50980
n_r	706.5	1.51289
n_C	656.3 Rojo	1.51432
$n_{C'}$	643.8 Rojo	1.51472
$n_{632.8}$	632.8	1.51509
n_D	589.3	1.51673
n_d	587.6	1.51680
n_e	546.1	1.51872
n_F	486.1 Azul	1.52238
$n_{F'}$	480.0 Azul	1.52283
n_g	435.8	1.52668
n_h	404.7	1.53024
n_i	365.0	1.53627

Observa cómo el índice de refracción aumenta con la longitud de onda. Puesto que el rojo corresponde a unos 650 nm, el verde a 550 nm y el azul a 475 nm, se cumple que $n(\text{rojo}) < n(\text{verde}) < n(\text{azul})$, o en términos de líneas de Fraunhofer, y aproximando la línea F con el azul, la D con el amarillo y la C con el rojo: $n_C < n_D < n_F$.

La mayoría de materiales usados en objetivos fotográficos tienen esta característica.

En la práctica, puesto que el índice de refracción del azul es el mayor, los rayos azules son los que más se desvían. Nada de esto debería sorprenderte pues es lo que observas cuando ves un arcoiris o un rayo de luz blanca atravesando un prisma.

La figura [figura 1.21](#) resume este fenómeno denominado dispersión.

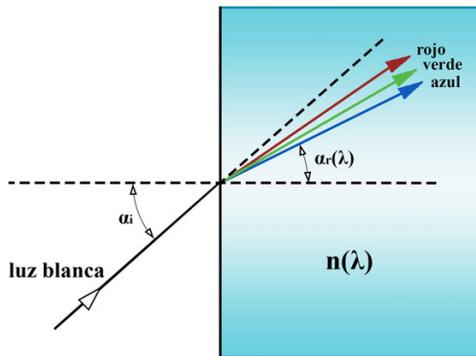


Figura 1.21: Dispersión.

¿Y cómo sabemos cuánto de bueno es un material para hacer lentes? Por ejemplo, ¿sería buena idea diseñar y fabricar nuestro objetivo con el cristal N-BK7 de Schott? La [tabla 1.4](#) podría completarse incluyendo todavía más pares de valores longitudes de onda - índices de refracción. Pero resulta poco práctico. Para condensar las características ópticas de un material no necesitamos tanta información; basta con dar dos valores, a saber:

- El valor del índice de refracción típico para una lente. Lo normal es especificar el valor para una longitud de onda intermedia. Por ejemplo, $n_e = n(546.1) = 1.51872$ o $n_d = n(587.6) = 1.51680$ para el N-BK7.

- Un número que cuantifique la dispersión de la lente, es decir, si el índice de refracción cambia más o menos según la longitud de onda considerada. Para ello se define el número Abbe. Relaciona los índices de refracción a diferentes longitudes de onda. El valor más típico es el número Abbe v_d para la línea amarilla d, que relaciona el índice de refracción para dicha línea respecto a la diferencia entre los valores para el rojo de la línea C (656.3 nm) y el azul de la línea F (486.1 nm):

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (1.12)$$

y el número Abbe para la línea e (546 nm):

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}} \quad (1.13)$$

Para el caso del N-BK7, sustituyendo valores, obtenemos $n_d = 1.51680$, $n_F - n_C = 0.008054$ y, sustituyendo, $v_d = 64.17$; del mismo modo, obtenemos $v_e = 63.96$.

Cuanto más alto sea el número Abbe, menor dispersión. En un mundo ideal con un índice de refracción constante $n(\lambda) = n$, el número Abbe tendería a infinito.

Por cierto, Abbe era un profesor en Jena dedicado a sus elucubraciones teóricas en física (óptica) cuando Zeiss contactó con él en 1866 (Zeiss era más mayor y ya tenía su empresa pero estaba atascado en el tema microscopios y decidió buscar alguien que le ayudara con buenos fundamentos teóricos). El resultado de la colaboración fue tan buena que Zeiss compartió su empresa con Abbe. A cambio, Abbe tuvo que renunciar a uno de sus principios: publicar todos sus descubrimientos; a partir de ahora eran propiedad intelectual de la empresa Carl Zeiss.

Otto fue alumno de Abbe y fue éste quien le metió el gusanillo que investigara cómo cambiaban las propiedades ópticas de un cristal o vidrio según su composición. Por supuesto, también acabaría trabajando con Zeiss. Vaya trío.

El fenómeno óptico asociado a la dispersión se llama aberración cromática (cada color converge en un punto diferente) y lo estudiaremos en el futuro libro sobre medidas de calidad y cómo minimizarlo. Visualmente son los típicos halos magenta y verde que suelen aparecer en los detalles más finos de una foto (por ejemplo, en las ramas más finas de un árbol y otros motivos similares con un fuerte contraste).

En el caso ideal que no hubiese dispersión, es decir, que el índice de refracción no dependiese de la longitud de onda, $n(\lambda) = n$, conseguiríamos que un punto blanco (que incluye todos los colores) se convirtiese en un punto blanco sobre el sensor. De no ser así, puede que los rayos verdes converjan sobre el sensor, pero los azules un poco antes y los rojos un poco después, produciendo un deterioro en la calidad de la imagen final. Resumiendo, cuanta menor dispersión tenga el material (más constante permanezca el índice de refracción a lo largo de todo el espectro), mejor.

Se suelen clasificar los vidrios según sus propiedades. El vidrio con un alto índice de refracción y un bajo número Abbe (alta dispersión) se llama pedernal (flint en inglés). Su opuesto, con un bajo índice de refracción y un alto número Abbe (baja dispersión) se llama corona (crown). Las lentes tipo corona suelen llevar una K y las de pedernal una F (todo viene del alemán; ahora ya sabes lo que significa N-BK7).

Adicionalmente, según el número Abbe, se suelen dar nombres comercialmente más atractivos a algunas lentes, como LD (low dispersion), ED (extra-low dispersion), SLD (special low dispersion), ELD (extraordinary low dispersion), ULD (ultra-low dispersion) o incluso XLD (extremely low dispersion).

Es imposible saber qué entiende cada fabricante por dispersión extremadamente baja, así que lo mejor es ver el valor del número Abbe. Como simplificación, podemos decir que a partir de $v_d = 60$ tenemos una lente de baja dispersión y así hasta $v_d > 90$ que tenemos una de dispersión extremadamente baja (por ejemplo, Schott atribuye dicha etiqueta comercial XLD a su cristal N-FK58, que tiene $v_d = 90.8$).

Aun siendo importante las características ópticas del material del que está hecho una lente, no hay que olvidar que un objetivo se compone de muchas lentes. Normalmente las lentes con un número Abbe muy alto suelen usarse para reducir la aberración cromática en conjunción con otras lentes o para sustituir grupos de lentes normales (por ejemplo, si para compensar algún error hay que colocar 5 lentes más y el resultado es un muerto de 6 kg, es el momento de usar una lente de baja dispersión que pueda sustituir todas esas lentes; por supuesto son mucho más caras, así que como veremos en el libro, el diseño de objetivos no es nada sencillo).

Un ejemplo. Fujifilm lanzó un zoom teleobjetivo en 2015, el Fujinon XF50-140 mm F2.8 R LM OIS WR. En la página web de Fuji encontramos su diseño:

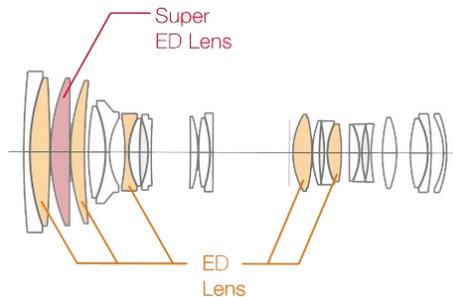


Figura 1.22: Diseño del Fujinon XF50-140 mm. Reproducido de <https://fujifilm-x.com/global/products/lenses/xf50-140mmf28-r-lm-ois-wr/specifications/>

Fíjate cómo el propio fabricante se encarga de publicitar que usa lentes de baja dispersión, ED (extra baja) y Super ED (vaya, esa sigla es nueva, no la habíamos usado antes).

El gremio de fotógrafos (y otros muchos) es muy dado a tecnicismos aunque no sepamos qué significan exactamente; simplemente los usamos como marca de status, en este caso fotográfico. Por ejemplo, no me negarás que quedas mejor si dices que tienes una full frame en vez de APS-C o si solo disparas en RAW y nunca en JPEG, etc. Con los objetivos pasa lo mismo; queda mucho mejor usar la palabra cristal (por objetivo) y encima que tenga lentes de (muy, super, mega, híper, ultra) baja dispersión (y si tienes alguna esférica, todavía quedas mejor, pero eso ya lo veremos luego).

Pero ¿qué significa ED o Super ED en este objetivo? Para ello hay que bucear un poco en internet hasta que encuentras el número de patente que corresponde con este objetivo, en este caso la US20170090163 (debe haber una versión japonesa anterior), aunque uno nunca puede estar seguro que esa patente corresponda con este objetivo por mucho que las especificaciones coincidan. Luego la buscas en la web de patentes de Estados Unidos y cuando la encuentras, la lees y observas que dice que la segunda, cuarta y séptima lente tienen $n_d = 1.497$ y $v_d = 81.54$, mientras que la tercera tiene $n_d = 1.439$ y $v_d = 94.94$.

Ahora sí queda claro que ED significa $v_d = 81.54$ y Super ED $v_d = 94.94$ para Fuji. Así que lo que Fuji llama Super ED, Schott lo llama XLD. En conclusión, dime el número Abbe y ahórrate el nombre comercial.

Capítulo 4

Enfoque

Enfocar consiste en hacer que la imagen del objeto o escena fotografiada se obtenga sobre el sensor con suficiente claridad. Cuando el enfoque es a infinito dicha imagen se forma justo una distancia focal por detrás del segundo plano principal del objetivo. En este tema explicamos qué ocurre cuando enfocamos a otras distancias. A través del análisis de algunos objetivos concretos explicamos diferentes formas de conseguirlo. Por último, explicamos cómo una cámara es capaz de enfocar automáticamente.

4.1 Introducción

Un objetivo está diseñado para conseguir una cierta nitidez en un rango de distancias de enfoque. Para ello el barrilete del objetivo suele disponer de un anillo de enfoque que al girarlo permite cambiar la distancia de enfoque.

Muchos objetivos suelen incluir una escala de distancias donde muestran la distancia de enfoque aproximada, que va desde la distancia más cercana hasta el símbolo ∞ que representa enfoque a infinito. Si el objetivo es tipo zoom (distancia focal variable), además del anillo de enfoque hay otro para cambiar la distancia focal.

Ajustar esa distancia de enfoque se puede hacer manualmente o automáticamente. En el caso de enfoque automático se habla de autofocus. Más adelante veremos los dos sistemas más populares de autofocus. Pero antes vamos a entender realmente qué ocurre dentro de un objetivo cuando cambiamos la distancia de enfoque.

En temas anteriores nos hemos centrado en el caso de enfoque a infinito, que nos ha permitido obtener la distancia focal a partir del cálculo de los puntos cardinales mediante trazado de rayos paraxiales. Ese caso lo hemos podido resolver porque tenemos acceso a través de la patente a los datos técnicos de todas las lentes del objetivo (formas de las superficies, grosor de las lentes, índices de refracción y distancias entre lentes).

Pero, cuando cambiamos la distancia de enfoque, ¿qué cambia en un objetivo? ¿qué tiene que hacer para enfocar a otra distancia?

La **Ecuación 3.44** relaciona la distancia de enfoque S con la focal f y la magnificación m de la foto.

$$S = f \left(\frac{1}{|m|} + 1 \right) + \overline{HH'} + f(1 + |m|)$$

Más interesante es interpretar esa ecuación como la suma de tres factores: empezando desde el objeto, el primer término $\frac{1}{|m|} + 1$ mide la distancia del objeto al primer plano principal, el segundo $\overline{HH'}$ la distancia entre el primer y el segundo plano principal y el tercero $f(1 + |m|)$ la distancia del segundo plano principal al plano imagen.

Vamos a centrarnos en cómo cambia este tercer factor cuando cambiamos la distancia de enfoque.

Cuando enfocamos a infinito $S = \infty$, la magnificación vale $m = 0$ y por tanto el tercer factor vale $f(1 + |m|) = f(1 + 0) = f$. Es decir, cuando enfocamos a infinito la imagen se forma a una distancia focal del segundo plano principal, que es justo la definición de foco trasero o foco imagen de un objetivo F' . Se coloca el sensor a esa misma distancia (el sensor coincide con el plano de la imagen que a su vez coincide con el plano focal trasero F') y se obtiene la imagen nítida.

A medida que se va enfocando más cerca, la imagen se va alejando del foco trasero F' . Según la magnificación que resulte de enfocar más cerca, sabemos que la imagen se forma a $f(1 + |m|)$ por detrás del segundo plano principal H' . Por tanto, la extensión extra entre foco trasero y plano imagen por no enfocar a infinito sino más cerca es $\Delta x = f|m|$. ¿Cómo conseguimos esa extensión extra?

4.2 Enfoque por extensión

El sensor de la cámara no se puede cambiar de sitio; su posición es fija dentro del cuerpo. Se suele indicar el plano del sensor en los cuerpos con el símbolo ϕ . Entonces, si no podemos alejar el sensor ¿cómo vamos a poder conseguir esa distancia extra que hay que separar el sensor del segundo plano principal?

Pues alejando el objetivo del sensor. Si desplazamos todas las lentes del objetivo una distancia Δx hacia la izquierda, habremos conseguido que la distancia del segundo plano principal al sensor sea la deseada y por tanto que el plano imagen coincida con la posición del sensor.

La **figura 4.1** muestra este caso de alejar la lente del sensor (en las figuras escribiré m en vez de $|m|$ para que queden más limpias).

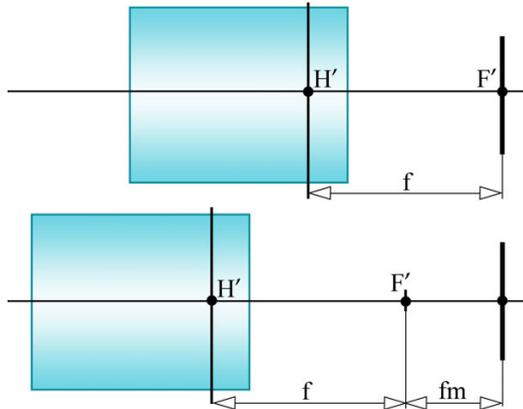


Figura 4.1: Distancia del segundo plano principal H' al plano imagen para enfoque a infinito (arriba) y enfoque más cercano (abajo). Enfoque por extensión.

Hay otra alternativa para conseguir esa distancia extra $f|m|$: colocar un fuelle (tubo de extensión regulable) entre el objetivo y el cuerpo; regulando la distancia del fuelle conseguiríamos alejar el sensor la distancia necesaria del objetivo. Obviamente es más sencillo mover las lentes internamente en un objetivo que colocar otro elemento entre cuerpo y objetivo. En macrofotografía se usan mucho los fuelles para conseguir ampliificaciones extra.

Alejar las lentes del sensor en la práctica supone que el elemento frontal del objetivo al mover el anillo de enfoque para reducir la distancia de enfoque empieza a sobresalir del objetivo. Alternativamente, puede que el barrilete del objetivo ya tenga este hueco previsto y cuando enfocas a infinito el elemento frontal esté metido un poco hacia dentro y cuando enfocas a la distancia más cercana llega justo hasta el borde del barrilete.

Por ejemplo, imagina que quieres fotografiar un paisaje con una distancia focal $f = 16$ mm. Primero haces la foto enfocando a infinito (a las montañas del fondo). En esa foto sabes que la imagen se forma 16 mm por detrás del segundo plano principal. Luego repites la foto enfocando a un elemento en primer término a 2 m que mejora la composición de la foto. ¿Qué cambia de enfocar a infinito a enfocar a 2 m?

Primero hay que calcular la magnificación cuando el enfoque es a 2 m. En el tema anterior hemos visto que cuando la distancia de enfoque es mucho mayor que la distancia focal $S \gg f$, la magnificación es muy pequeña y se puede calcular usando la [Ecuación 3.46](#):

$$2 \simeq \frac{f}{|m|} \quad (4.1)$$

Despejando con $f = 16$ mm, obtenemos $|m| = 0.008$. Como imaginábamos, una magnificación muy pequeña (como el objeto está a muchas distancias focales del sensor, en concreto $S = (2000/16)f = 125f$, la distancia de enfoque es aproximadamente igual a la distancia del primer plano al objeto $S = 125f \simeq f(1 + 1/|m|)$, de donde la magnificación es $1/(125 - 1) \simeq 1/125 = 0.008$).

Por consiguiente, hay que mover todas las lentes del objetivo una distancia $\Delta x = f|m| = 16 \cdot 0.008 = 0.128$ mm hacia la izquierda. Como ves, el desplazamiento a realizar es minúsculo. Cualquier enfoque entre 2 m e infinito requerirá de un desplazamiento todavía más pequeño de las lentes.

A medida que enfoques más cerca de esos 2 m el desplazamiento irá aumentando. Ese desplazamiento se consigue mecánicamente al girar el barril de enfoque, ya sea manualmente, ya sea usando el autofocus. Este es el mecanismo de enfoque usado por muchos objetivos antiguos.

Este tipo de enfoque se llama enfoque por extensión, pues lo único que hay que hacer es mover el conjunto de lentes alejándolo Δx de la posición de enfoque a infinito, o sea, desplazar hacia la izquierda todos los elementos una distancia $f|m|$ mm.

Fíjate que Δx es proporcional a la distancia focal: un teleobjetivo se extenderá más que un angular a medida que vayas enfocando más cerca.

Un problema del enfoque por extensión es que el elemento frontal gira al realizar el desplazamiento, con lo que dificulta el uso de filtros como el polarizador.

4.2.1 Nikon AF Nikkor 35mm F2 D

El objetivo Nikon AF-Nikkor 35mm F2 D es un objetivo clásico del que se han vendido cientos de miles de unidades. En la [figura 4.2](#) tenemos el diseño, compuesto de seis lentes, dos de ellas cementadas, y el trazado de rayos para el caso de enfoque a infinito. La línea de la derecha representa la posición del sensor (la película química de entonces).

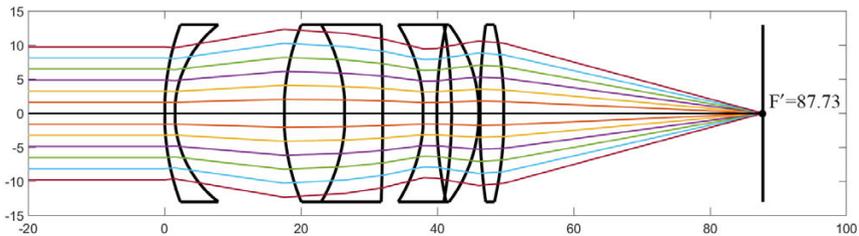


Figura 4.2: Nikon AF-Nikkor 35mm F2 D. Posición de las lentes y el sensor para enfoque infinito.

Es un diseño básico funcional de la época muy económico, por supuesto sin lentes esféricas ni otras sofisticaciones de diseños actuales. La longitud total desde la primera superficie hasta la última del objetivo es 49.8 mm y la imagen se forma a 87.73 mm, coincidiendo con la posición del sensor como no podía ser de otra manera al enfocar a infinito. Es decir, el foco imagen para enfoques a infinito vale $F' = 87.73$ mm.

Prolongando los rayos de entrada y salida, obtenemos el punto de intersección que define el segundo plano principal, $H' = 51.71$ (ver figura 4.3).

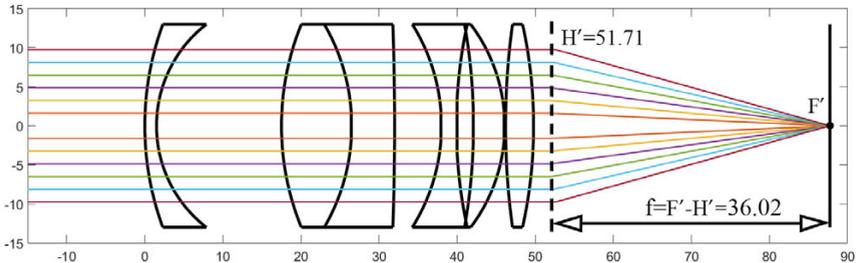


Figura 4.3: Nikon AF-Nikkor 35mm F2 D. Segundo plano principal, foco trasero y distancia focal.

La distancia focal es la distancia entre ambos puntos $f = 87.73 - 51.71 = 36.02$ mm (el objetivo se vendía comercialmente como uno de 35 mm).

Trazando rayos de derecha a izquierda obtenemos el foco objeto $F = -1.57$ y el primer punto principal $H = 34.45$. La distancia entre planos principales vale $\overline{HH'} = 51.71 - 34.45 = 17.26$ mm.

¿Qué ocurre cuando enfocamos a otra distancia? En las especificaciones técnicas del objetivo https://www.nikon.es/es_ES/product/discontinued/nikkor-lenses/2021/af-nikkor-35mm-f-2d#tech_specs, Nikon informa que la distancia mínima de enfoque es $S_{min} = 25$ cm y que la magnificación asociada es $|m| = 1/4.22$.

El objetivo desplaza las lentes $\Delta x = 8.519$ mm (menos de 1 cm para que te hagas una idea de lo poco que se mueve para cambiar de enfocar de infinito a tan solo 25 cm) hacia la izquierda hasta la posición mostrada en la [figura 4.4](#). El sensor sigue estando en la misma posición 87.73 mm.

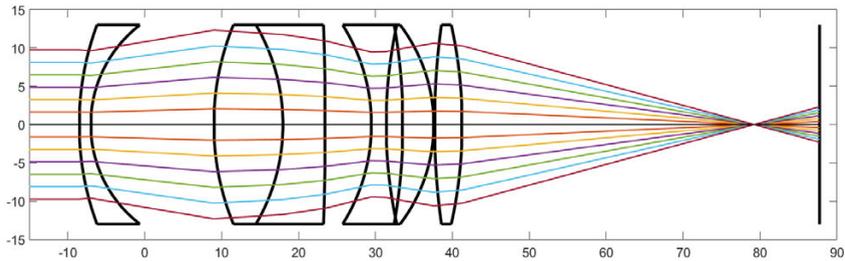


Figura 4.4: Nikon AF-Nikkor 35mm F2 D. Enfoque a 25 cm. Imagen de un objeto en infinito.

Como consecuencia del desplazamiento de las lentes, el origen de coordenadas ya no coincide con el vértice de la primera superficie y los puntos cardinales se desplazan 8.519 mm hacia la izquierda.

Como vemos en la figura, los rayos de entrada paralelos convergen ahora en un punto 8.519 mm por delante del sensor, produciendo un círculo de confusión sobre el sensor. Confirmamos que con esta configuración de las lentes el sensor no capta una imagen nítida de un objeto en el infinito; el plano imagen F' ya no coincide con la posición del sensor.

Nos queda por comprobar si realmente enfoca a 25 cm. Para ello, colocamos un objeto sobre el eje a la distancia $S = 25$ cm y trazamos rayos.

Puesto que la distancia total debe ser 25 cm, la distancia respecto al origen del objeto es $L = 87.73 - 250 = -162.27$ mm. Conociendo L trazamos rayos desde ese punto tal y como explicamos en la [sección 2.3](#) y obtenemos la [figura 4.5](#).

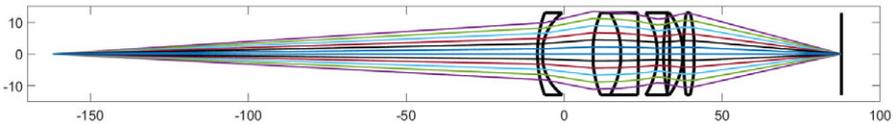


Figura 4.5: Nikon AF-Nikkor 35mm F2 D. Enfoque a 25 cm. Imagen de un objeto a 25 cm.

Efectivamente confirmamos que con las lentes colocadas en esa posición la imagen de un objeto situado a -162.27 mm se obtiene sobre el sensor.

Del mismo modo, podemos comprobar gráficamente que la magnificación a esa distancia de enfoque vale $|m| = 1/4.22$. Para ello, calculamos la imagen de un objeto de altura $y = 20$. La [figura 4.6](#) muestra la trayectoria de algunos rayos provenientes de dicho objeto.

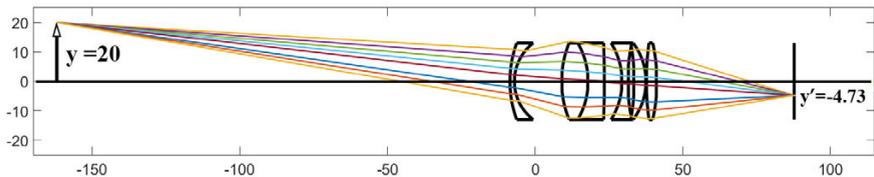


Figura 4.6: Nikon AF-Nikkor 35mm F2 D. Magnificación para enfoque a 25 cm.

La imagen se produce sobre el sensor, con una altura $y' = -4.73$.

La magnificación vale $|m| = |-4.73/20| = 0.237 = 1/4.22$, que coincide con las especificaciones técnicas de Nikon.

Además de gráficamente trazando rayos, podemos comprobar estos valores analíticamente. Por ejemplo, la distancia de enfoque S se puede obtener a partir del valor de magnificación $|m| = 1/4.22$ y los valores de distancia entre planos principales $\overline{HH'} = 17.26$ y focal $f = 36.02$ calculados previamente:

$$S = 36.02 \cdot (1 + 4.22) + 17.26 + 36.02 \cdot (1 + 1/4.22) = 249.84$$

Como es el caso de máxima magnificación que se puede conseguir con este objetivo, la distancia de enfoque es la distancia mínima $S_{min} = 249.84$ mm, o sea, los 25 cm que dice Nikon en su hoja de especificaciones para este objetivo.

Si lo que conocemos es la extensión Δx (lo que se ha separado el segundo plano principal del sensor, en nuestro caso $\Delta x = 8.52$ mm), podemos calcular la magnificación a partir de ese dato: $\Delta x = f|m| = 36.02 \cdot |m| = 8.52$, de donde $|m| = 8.52/36.02 = 0.237 = 1/4.22$ que coincide nuevamente con el dato del catálogo de Nikon.

Esta idea que aumentar la distancia entre objetivo y sensor aumenta la magnificación es el fundamento del uso de tubos de extensión en macrofotografía.

Por ejemplo, si colocamos un tubo de 20 mm de extensión entre el objetivo y el cuerpo, ¿qué pasa? Los parámetros del objetivo no cambian pues no hemos tocado ninguna lente; el objetivo sigue siendo de focal 36.02 mm y la distancia entre los planos principales es la misma; lo único es que antes se enroscaba directamente al cuerpo de la cámara y ahora se conecta al tubo.

Así que al colocar el tubo en medio, el objetivo se ha alejado 20 mm más del sensor respecto al caso anterior, $\Delta x' = 20 + 8.52 = 28.52$ mm.

De $\Delta x' = f|m|$, tenemos que la magnificación con el tubo puesto vale $|m| = \Delta x'/f = 28.52/36.02 = 0.79$. Es decir, alejar 20 mm el sensor del objetivo con el tubo ha hecho que la magnificación pase de 0.24 a 0.79, más del triple.

Resumiendo, cada vez que añadas un tubo de extensión de longitud l , la magnificación aumenta $\Delta m = l/f$. En el ejemplo, $l = 20$, $f = 36.02$, con lo que $\Delta m = 0.56$.

Hace falta una extensión igual a la distancia focal para ganar una unidad de magnificación $\Delta m = f/f = 1$. Por eso es más difícil conseguir aumentos en la magnificación con focales más largas. Por ejemplo, para un objetivo de $f = 100$ mm habrá que colocar un tubo de 100 mm para aumentar una unidad la magnificación, mientras que con ese mismo tubo la magnificación aumenta 2 si usas un objetivo de 50 mm.

Visto así parece muy fácil y barato (un tubo no es más que aire) conseguir un objetivo macro a partir de un objetivo normal. Pero todo tiene un precio. Al alejar el sensor se pierde mucha luz y la distancia de enfoque se acorta complicando la realización de la foto.

Por ejemplo, sabemos que el Nikon AF-Nikkor 35mm F2 D consigue su máxima magnificación $|m| = 0.24$ cuando la distancia de enfoque vale $S = 25$ cm.

Cuando le añadamos el tubo de 20 mm, la magnificación aumenta hasta $|m| = 0.79$ y la distancia de enfoque queda $S = f \left(\frac{1}{|m|} + 1 \right) + \overline{HH'} + f(1 + |m|) = 163.3$ mm. Es decir, si colocas un objeto a poco más de 16 cm del sensor, tendrás su imagen nítida y con 0.79 aumentos.

La distancia de enfoque se ha reducido sensiblemente, de 25 a 16.3 cm. ¿Qué significa esta reducción? La distancia de enfoque medida desde el primer punto principal queda $S_{H1} = f \left(\frac{1}{|m|} + 1 \right) = 81.51$ mm. Teniendo en cuenta que el primer plano principal está situado a 34.48 mm de la primera superficie, nos queda tan solo una distancia de trabajo por delante del objetivo de $81.51 - 34.48 = 47.03$ mm; es decir, el objeto hay que colocarlo a tan solo ¡4.7 cm delante del objetivo!

La [figura 4.7](#) representa esta foto.

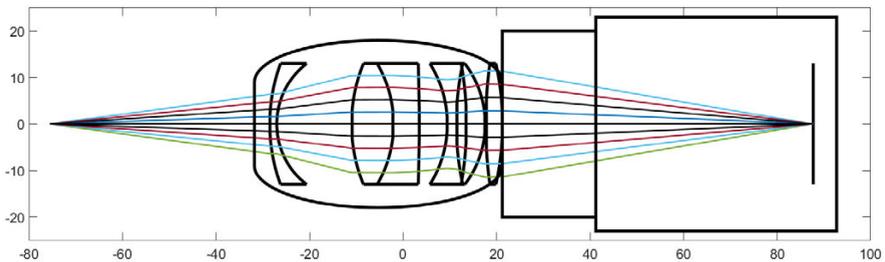


Figura 4.7: Nikon AF-Nikkor 35mm F2 D. Enfoque a 25 cm. Imagen de un objeto a 16.3 cm.

Además de la trayectoria de los rayos he añadido los dispositivos involucrados: el objetivo que contiene las lentes, que mide 44.5 mm de largo según datos de Nikon, la extensión del tubo de 20 mm y el cuerpo de la cámara. Para dibujar el cuerpo he usado la distancia de registro de la montura Nikon F que vale 46.5 mm (distancia del plano sensor hasta donde se enrosca el objetivo o, en este caso, el tubo de extensión). En la figura resulta muy intuitivo hacerse una idea de la escasa distancia que hay del objeto fotografiado a la cámara.

La distancia de trabajo se ha reducido mucho. La profundidad de campo también se reduce (disminuye cuando aumenta la magnificación). Cada vez tienes menos espacio entre el objetivo y el objeto y además tienes que ser muy preciso con esa distancia; como te vayas unos mm el objeto saldrá borroso.

Añadir un tubo de extensión tiene otros efectos secundarios como la pérdida del enfoque a infinito (cuando enfocas a infinito el foco trasero que es el plano imagen ya no cae sobre el sensor) y sobre todo la pérdida de luz (en el siguiente capítulo en la [subsección 5.9.2](#) explicamos cómo influye la magnificación en la exposición).

4.3 Enfoque por desplazamiento interno

¿Hay alguna alternativa a desplazar todos los elementos de un objetivo cuando cambias la distancia de enfoque? Obviamente las formas de las superficies y el grosor y el material de las lentes no pueden cambiar. Pero sí podemos cambiar la posición relativa de las lentes, es decir, mover unas cuantas alejándolas o acercándolas según lo que queramos. Este es el otro sistema de enfoque: el desplazamiento interno de grupos de lentes, que es el que usa hoy día la práctica totalidad de objetivos.

El cambio de las distancias entre lentes hace que los planos principales se vayan moviendo de sitio según la distancia de enfoque elegida. Esta segunda solución la mostramos en la [figura 4.8](#).

El diseño de objetivos es una disciplina muy compleja más allá del propósito de este libro. Como toda disciplina científica, ha experimentado avances de manera continua apareciendo nuevos diseños de objetivos que intentaban resolver los problemas de los anteriores o simplemente resolver nuevos problemas (por ejemplo, cómo conseguir que cupiese el espejo en el cuerpo de las cámaras réflex para objetivos con una focal muy pequeña).

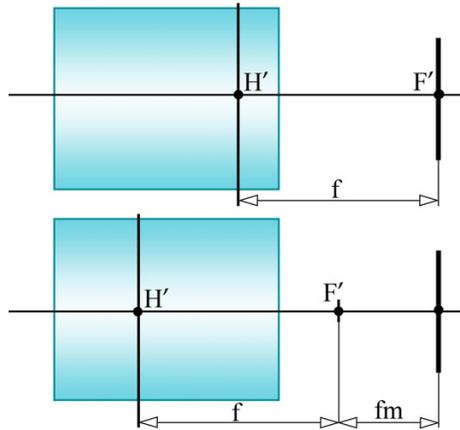


Figura 4.8: Distancia del segundo plano principal H' al plano imagen para enfoque a infinito (arriba) y enfoque más cercano (abajo). Enfoque por desplazamiento interno.

Por cierto, mi época favorita es el primer tercio del s. XX, donde se produjeron grandes avances (en aquella época los nombres de los objetivos hacían referencia muchas veces al inventor; con la aparición y predominio de las marcas japonesas en la segunda mitad del siglo XX se pasó a la nomenclatura actual donde cada objetivo es una sopa de letras).

Hoy en día todos los cálculos se realizan con ordenadores que se dedican a encontrar los parámetros óptimos a partir de un diseño base. Por no irnos muy lejos en el tiempo, resulta maravilloso leer historias de los grandes ingenieros de Nikon, Canon, etc. y su flujo de trabajo a la hora de proponer un nuevo objetivo, en muchos casos basado en su experiencia e intuición (en aquella época costaba más calcular los rayos que hacer un prototipo y probarlo). Unos auténticos alquimistas.

La utilización de ordenadores hoy día, como en la mayoría de disciplinas ingenieriles, facilita los cálculos y obtener mejores diseños a costa de una pérdida en el conocimiento básico de la disciplina.

Hay infinidad de diseños según el tipo de función para el que se diseña el objetivo (focal fija, zoom, macro, angular, tele, etc.) En esta sección vamos a ver algunos ejemplos de objetivos para hacernos una idea de cómo funcionan.

Vamos a utilizar la misma teoría que hasta ahora; lo único que va a cambiar son los parámetros de cada objetivo y que ahora no se va a mover todo el objetivo cuando cambiemos la distancia de enfoque, sino solo unos elementos.

4.3.1 Canon RF 50 mm F1.2 L USM

Vamos a empezar estudiando el Canon RF 50 mm F1.2 L USM. En la [subsección 3.11.1](#) dejamos sin acabar el cálculo exacto de la distancia mínima de enfoque para este objetivo. Ha llegado el momento de resolverlo.

En la patente del objetivo tenemos el caso de enfoque a infinito ya estudiado y el caso de enfoque cuando $|m| = 0.19$. Es decir, nos da los dos casos extremos: distancia máxima de enfoque $S = \infty$ con mínima magnificación $|m| = 0$ y distancia mínima de enfoque 40 cm con máxima magnificación $|m| = 0.19$. El dato de 40 cm viene dado en la web de Canon; aun así vamos a calcularlo nosotros también en breve.

La única variable que cambia en ambos casos es la distancia entre la superficie 19 y la 20.

Cuando el enfoque es a infinito, vale $t_{19,20} = 1.95$ mm (figura 4.9 arriba); cuando enfocamos a 40 cm vale $t_{19,20} = 14.60$ mm (figura 4.9 abajo).

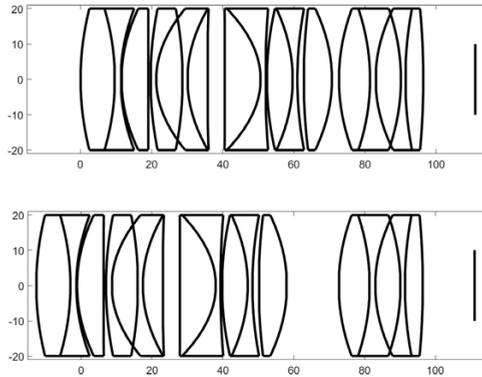


Figura 4.9: Canon RF 50 mm F1.2 L USM. Posición de las lentes y el sensor para enfoque infinito (arriba) y enfoque a 40 cm (abajo).

La figura muestra también la posición del sensor a la derecha. Dicha posición coincide con el foco trasero cuando enfocamos a infinito, cuyo valor ya calculamos en la [subsección 3.8.1](#) $F' = 111.01$ mm.

Como vemos en la figura, a medida que vamos reduciendo la distancia de enfoque, hay un grupo de lentes que se va moviendo hacia delante (izquierda en la figura) separándose del sensor. Así pues, aunque no todas las lentes se muevan hacia delante, lo cierto es que su funcionamiento es muy parecido al sistema por extensión. El caso de máxima separación es el de la figura, consiguiendo la máxima magnificación $|m| = 0.19$ para este objetivo.

En la [subsección 3.8.1](#) calculamos los puntos cardinales cuando el enfoque era a infinito. Ahora vamos a calcularlos para el caso $|m| = 0.19$.

Lo primero que hay que hacer es comprobar qué distancia focal tiene este objetivo cuando el enfoque es para $|m| = 0.19$. Repetimos el mismo procedimiento que cuando el enfoque era a infinito: trazar rayos paralelos, obtener el foco trasero F' , prolongar los rayos de entrada y salida hasta encontrar el segundo punto principal H' y finalmente calcular la distancia focal como la distancia entre H' y F' .

La [figura 4.10](#) muestra la trayectoria de los rayos provenientes de infinito.

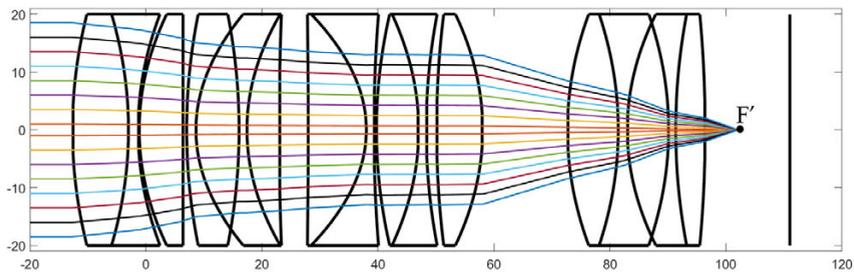


Figura 4.10: Foco trasero F' del Canon RF 50 mm F1.2 L USM cuando $|m| = 0.19$.

El foco trasero obtenido ahora vale $F' = 102.06$ mm. Es decir, la imagen se forma antes del sensor. Si prolongas los rayos más allá de F' hasta que cortan el sensor, verás que forman un círculo, con lo que confirmamos que con esta disposición de las lentes los objetos en infinito se verán borrosos (más o menos borrosos según el tamaño del círculo de confusión).

La **figura 4.11** muestra el segundo punto principal H' , calculado como ya sabemos buscando el punto de corte de las prolongaciones de los rayos de entrada y salida. El resultado es $H' = 50.03$ mm.

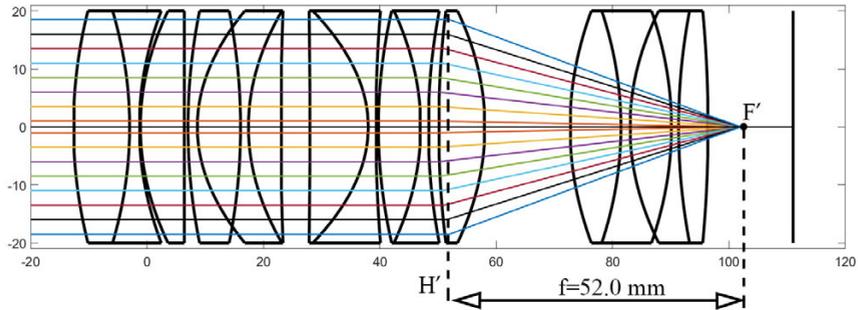


Figura 4.11: Distancia focal del Canon RF 50 mm F1.2 L USM cuando $|m| = 0.19$.

Por tanto, la distancia focal vale $f = \overline{H'F'} = 102.06 - 50.03 = 52.03$ mm. Es decir, el objetivo cambia mínimamente su distancia focal cuando pasamos de enfocar a infinito ($f = 51.1$ mm) a enfocar a la distancia mínima de enfoque ($f = 52.0$ mm).

El otro dato de interés es la distancia entre planos principales. Para ello hay que calcular el foco objeto y el primer plano principal.

La **figura 4.12** muestra la trayectoria de los rayos provenientes de infinito por la derecha. El valor obtenido es $F = -16.60$.

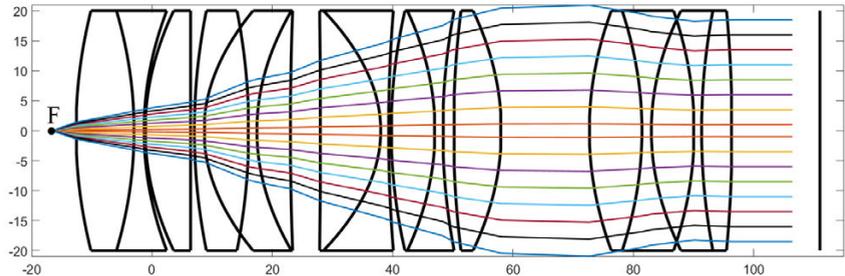


Figura 4.12: Foco delantero para enfoque cercano del Canon RF 50 mm F1.2 L USM.

En la **figura 4.13** calculamos el primer plano principal. El resultado es $H = 35.43$ mm.

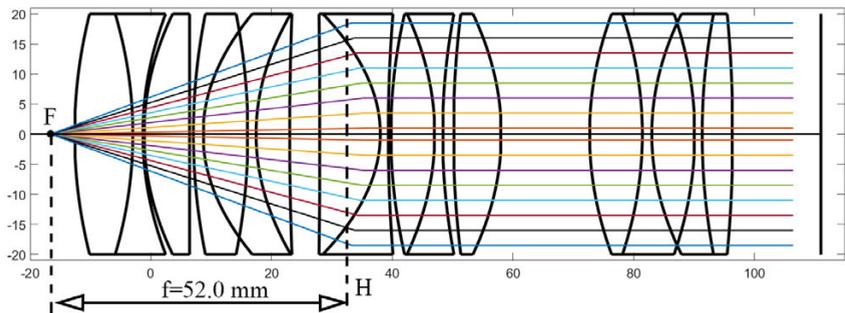


Figura 4.13: Primer plano principal para enfoque cercano del Canon RF 50 mm F1.2 L USM.

Comprobamos que la distancia focal vale $\overline{FH} = 35.43 - (-16.60) = 52.03$, es decir, lo mismo que la calculada antes $f = 52.0$. Lo que nos interesa es la distancia $\overline{HH'} = 50.03 - 35.43 = 14.60$ mm.

Conocida la distancia entre planos principales, distancia focal y magnificación, la distancia de enfoque obtenida es:

$$S = 52.03 \left(\frac{1}{0.19} + 1 \right) + 14.60 + 52.03(1 + 0.19) = 402.31 \quad (4.2)$$

La diferencia entre el valor calculado por nosotros y el especificado por Canon es de apenas $402.31 - 400 = 2.31$ mm, apenas un 0.5 %, no está mal (posiblemente la diferencia se deba al redondeo al pasar a cm los 402 mm; estaría bien tener este objetivo para probarlo). En cuanto al valor calculado en la [subsección 3.11.1](#), la principal diferencia es que ahora hemos usado la distancia entre planos correcta y que la focal ha cambiado mínimamente, pasando de 51 a 52 mm.

Aunque es cierto que algunas lentes no cambian de posición al cambiar de distancia de enfoque, lo cierto es que básicamente este objetivo es una versión moderna del método de enfoque por extensión. Así que vamos a ver otro ejemplo donde realmente la distancia entre el vértice de la primera superficie y el de la última superficie no cambie y que sean las lentes internas las que se mueven.

4.3.2 Fujinon XF 16mm F1.4 R WR

Vamos a analizar qué ocurre con el Fujinon XF 16mm F1.4 R WR de Fuji. Es un objetivo angular muy luminoso ideal para fotografía nocturna o en interiores con poco luz.

Es una lente para el sistema Fuji X, que utiliza un sensor APS-C de dimensiones 15.6×23.6 mm, con lo que se obtiene el mismo ángulo de visión que con un objetivo de $16 \cdot (24/15.6) = 24$ mm en un sensor full frame 24×36 mm.

En la [subsección 1.2.2](#) utilizamos este objetivo de ejemplo para explicar cómo se definen las superficies de un objetivo. Ahora vamos a analizar sus puntos cardinales y qué ocurre cuando enfocamos a infinito o a la distancia de enfoque más cercana. Puedes repasar la [figura 1.9](#) para ver el diseño de este objetivo tal y como aparece en la web de Fuji. Nosotros lo reproducimos a partir de los datos de la patente.

En la [figura 4.14](#) tenemos el caso de enfoque a infinito.

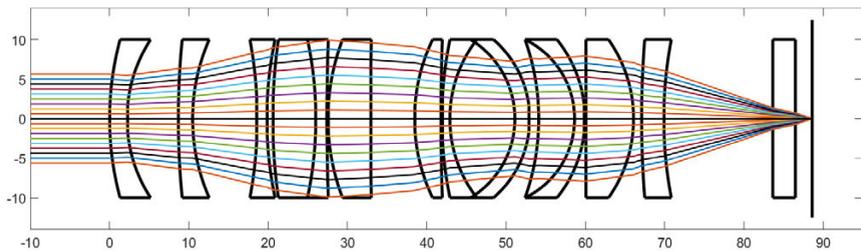


Figura 4.14: Enfoque a infinito del Fujinon XF 16mm F1.4 R WR.

Si comparas el diseño de la [figura 4.14](#) con el de la [figura 1.9](#) verás dos diferencias. La primera es el tamaño de las lentes; en nuestra reproducción todas las lentes son del mismo tamaño $\phi = 2 \cdot 10 = 20$ mm de diámetro, mientras que en el objetivo real el elemento frontal es mucho más grande (en el tema siguiente analizaremos el tamaño real de las lentes).

La segunda diferencia es que en nuestro dibujo en la [figura 4.14](#) hemos incluido a continuación del objetivo dos elementos que forman parte del cuerpo de la cámara: el sensor (la línea de la derecha) y un dispositivo óptico que se coloca sobre el sensor (el rectángulo sobre el sensor). Dicho dispositivo tiene ambas superficies planas y representa el posible filtro paso bajo, filtro anti-infrarrojos, vidrio de protección, etc. que tenga la cámara.

Así pues, el objetivo corresponde a las primeras 13 lentes del dibujo, que van desde el primer vértice $V = 0$ hasta el último $V' = 69.88$ mm. Según las especificaciones técnicas, el objetivo mide en total 73 cm. El sensor se encuentra a 88.6 mm del primer vértice y 18.7 mm por detrás de la última superficie. La montura Fuji X tiene una distancia de registro de 17.7 mm, con lo que los valores del dibujo encajan con las medidas reales.

Observa cómo al tratarse de una cámara sin espejo, el objetivo ha podido diseñarse para que sea de tamaño muy reducido.

El trazado de rayos paraxiales de la [figura 4.14](#) confirma que todos los rayos de entrada horizontales (provenientes de un objeto en infinito) convergen sobre el sensor. Es decir, el plano imagen coincide con el sensor. Además sabemos que el punto de corte con el eje es por definición el foco imagen; de la figura obtenemos su valor $F' = 88.60$ mm.

Prolongando los rayos de salida y entrada obtenemos el segundo punto principal $H' = 72.13$ mm. La distancia focal es la distancia entre ambos puntos $f = \overline{H'F'} = 88.60 - 72.13 = 16.47$ mm, es decir, los 16 mm que marca el nombre del objetivo (ver [figura 4.15](#)).

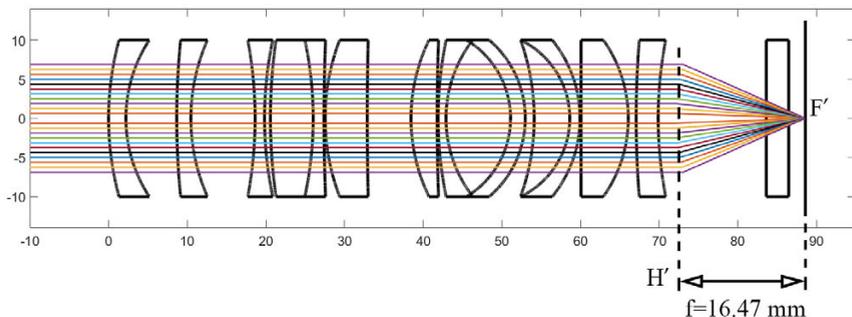


Figura 4.15: Distancia focal del Fujinon XF 16mm F1.4 R WR.

Trazando los rayos de derecha a izquierda obtenemos el foco objeto F y el primer punto principal H . Los valores obtenidos son $F = 15.29$ mm y $H = 31.77$ mm. La distancia focal es la resta $f = \overline{FH} = 31.77 - 15.30 = 16.47$ mm, el mismo valor que hemos obtenido antes. La distancia entre planos principales cuando enfocamos a infinito vale $\overline{HH'} = 72.13 - 31.77 = 40.36$ mm.

Veamos el caso de enfoque más cercano. Las especificaciones técnicas del objetivo en la web de Fuji <https://fujifilm-x.com/global/products/lenses/xf16mmf14-r-wr/specifications/> no dicen nada de la distancia mínima de enfoque. Lo que sí incluyen es la magnificación máxima $m = 0.21$.

Lo primero que necesitamos es la disposición de las lentes para esta magnificación. En la [figura 4.16](#) tenemos la posición para el caso anterior de enfoque a infinito (arriba) y el caso actual de enfoque cuando $|m| = 0.21$ (el valor exacto que dice la patente es $|m| = 0.209$).

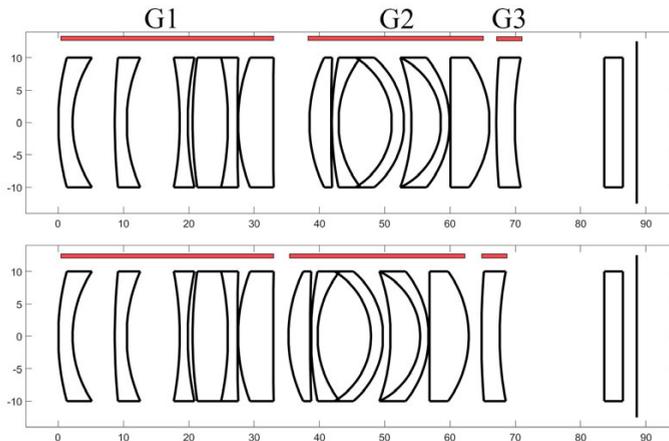


Figura 4.16: Posición de las lentes para enfoque a infinito $m = 0$ (arriba) y $|m| = 0.21$ (abajo) para el Fujinon XF 16mm F1.4 R WR.

A efectos de desplazamiento, el objetivo se puede dividir en tres grupos. El primer grupo abarca de la lente 1 a la 6, de las cuales la 4 y la 5 están cementadas (comparten una superficie). Corresponde a las lentes desde el vértice $V = 0$ hasta $V_{11} = 32.89$ mm (al haber dos lentes cementadas hay 11 superficies en vez de 12). Este grupo no se mueve al cambiar la distancia de enfoque.

El segundo grupo va de la lente 7 a la 12. En este caso las lentes 10 y 11 están cementadas. Corresponde al grupo de lentes desde $V_{12} = 38.46$ hasta $V_{22} = 66.08$ mm.

Partiendo de la posición para enfoque a infinito (figura 4.16 arriba), a medida que se va reduciendo la distancia de enfoque, este grupo comienza a desplazarse hacia delante acercándose al primer grupo de lentes. El caso límite es cuando la distancia de enfoque es mínima y la magnificación máxima $|m| = 0.21$ (figura 4.16 abajo); en este caso se han acercado unos 3 mm al grupo de lentes delantero.

El tercer grupo lo forma una única lente, la última lente del objetivo, la número 13. Esta lente también se acerca al primer grupo a medida que enfocamos más cerca, pero lo hace menos que el segundo grupo. El efecto neto es que la lente 13 se separa de la 12 aproximadamente 1 mm más para la distancia mínima de enfoque que para enfoque a infinito.

A continuación calculamos los puntos cardinales para la posición de las lentes cuando $|m| = 0.21$.

La [figura 4.17](#) muestra la trayectoria de los rayos paralelos para calcular el foco F' .

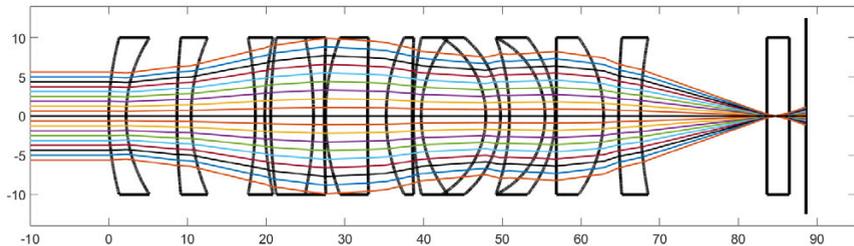


Figura 4.17: Distancia focal del Fujinon XF 16mm F1.4 R WR para $|m| = 0.21$.

En este caso se produce un fenómeno curioso. Los rayos al entrar en el último vidrio (el filtro paso bajo o lo que sea que esté sobre el sensor) se cruzan sobre el eje en su viaje hasta que atraviesan dicho elemento. Ese punto de corte no es el foco imagen. El foco imagen se define como el punto donde los rayos cortan al eje *después* de atravesar todos los elementos. Para que lo veas mejor, en la [figura 4.18](#) he ampliado la zona de interés (he eliminado algunos rayos para que la figura quede más clara).

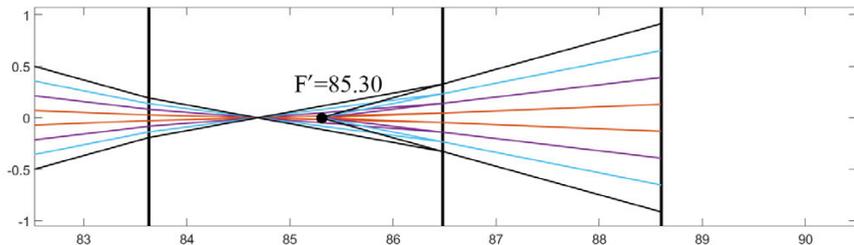


Figura 4.18: Foco imagen F' del Fujinon XF 16mm F1.4 R WR para $|m| = 0.21$.

Las líneas verticales representan, de izquierda a derecha, la primera superficie del filtro, la segunda superficie del filtro y el sensor.

El foco es el punto de corte $F' = 85.30$ mm, que se obtiene de prolongar hasta que corten el eje los rayos después de atravesar por completo el filtro.

El segundo punto principal vale $H' = 69.49$, con lo que la distancia focal para la magnificación máxima $|m| = 0.21$ vale $f = 85.30 - 69.49 = 15.81$ mm. Es decir, la focal prácticamente no cambia en todo el rango de distancias de enfoque $15.81 < f < 16.47$ mm.

Obtenemos gráficamente el resto de puntos cardinales trazando rayos de derecha a izquierda; los valores obtenidos son $F = 14.28$, $H = 30.09$ mm. Como no podía ser de otra forma, la focal es la misma que antes $f = 30.09 - 14.28 = 15.81$ mm.

Conocidos los puntos cardinales no solo podemos calcular la focal, sino la distancia entre planos principales, $\overline{HH'} = 69.49 - 30.09 = 39.40$ mm. Necesitamos ese dato para calcular la distancia mínima de enfoque S_{min} :

$$S_{min} = 15.81 \left(\frac{1}{0.21} + 1 \right) + 39.40 + 15.81(1 + 0.21) = 149.62 \quad (4.3)$$

Teniendo en cuenta que esa distancia se mide desde el sensor, que está 88.60 mm detrás del primer vértice del objetivo, tenemos que el objeto se encuentra a $88.60 - 149.62 = -61.02$ mm de la primera superficie del objetivo. Es decir, la distancia de trabajo (la distancia del objeto a la primera superficie) es aproximadamente 6 cm.

Como ves, este objetivo es capaz de enfocar muy cerca. Y lo mejor es que hemos calculado dicha distancia por nosotros mismos; Fuji tan solo especifica la magnificación máxima, no incluye a qué distancia corresponde dicha magnificación.

Siendo más rigurosos con la nomenclatura, este objetivo corresponde al caso de enfoque trasero más que a enfoque interno pues la última lente también se mueve.

El enfoque por desplazamiento fue desarrollado inicialmente en los 70 para acortar los desplazamientos de los teleobjetivos. Hoy día son práctica común tanto en zooms como objetivos de focal fija frente al enfoque por extensión. La ventaja es que al no tener que mover todo el objetivo se puede hacer más rápido y de manera más eficiente. En una palabra, enfocar más rápido y sin que el objetivo se haga físicamente más grande, lo cual puede molestar a la hora de hacer fotos (menor distancia de trabajo, problema con los filtros, ...).

4.4 Enfoque cambiando la distancia focal

¿Se te ocurre alguna otra forma de conseguir la distancia extra $f|m|$ cuando no enfocas a infinito? Observa la [figura 4.19](#).

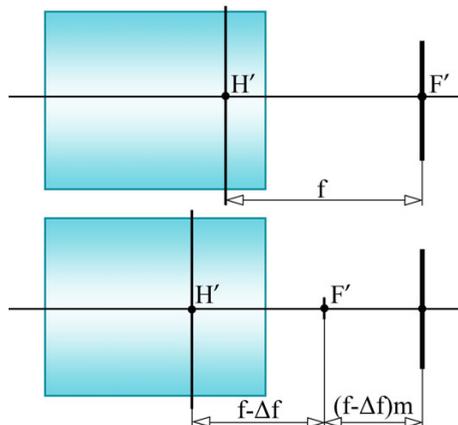


Figura 4.19: Distancia del segundo plano principal H' al plano imagen para enfoque a infinito (arriba) y enfoque más cercano (abajo). Enfoque cambiando la focal.

Los vértices de la primera y última superficie son los mismos. Es decir, la longitud total del objetivo no cambia de enfocar a infinito o más cerca. Al igual que en el sistema de enfoque por desplazamiento interno, algunas lentes se han movido, pero no la primera ni la última.

En este caso, ese desplazamiento de las lentes internas ha provocado no solo un desplazamiento del segundo punto principal, sino además un cambio en la distancia focal. Es decir, se enfoca por cambio de distancia focal.

Observa en la figura cómo la distancia focal $\overline{H'F'}$ es más pequeña cuando enfocamos más cerca. Cuando enfocamos a infinito vale f y cuando enfocamos a la distancia correspondiente a la magnificación m , la focal ha disminuido; ahora vale $f' = f - \Delta f$.

¿Qué se consigue reduciendo la focal? Que el enfoque se produzca a una distancia más cercana. Sabemos que la distancia Δx que queda por detrás del foco trasero F' hasta el plano imagen vale $\Delta x = f'|m|$. Así pues, si medimos esa extensión Δx y la nueva focal f' por trazado de rayos, podemos despejar la magnificación $|m|$ y calcular la distancia de enfoque.

Alternativamente, si el dato es $|m|$ (por ejemplo, en macrofotografía), podemos averiguar la focal para distancias más cercanas como $f' = \Delta x/|m|$.

La diferencia con el método del apartado anterior es que la focal no cambiaba, la extensión extra $f|m|$ se conseguía moviendo las lentes de tal forma que solo cambiaba la posición de los puntos principales.

4.4.1 Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM

Ya que hemos mencionado varias veces la macrofotografía, vamos a estudiar un objetivo macro y ver qué ocurre cuando cambia la distancia de enfoque y con ello la magnificación. El objetivo es el Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM <https://www.canon.es/lenses/ef-100mm-f-2-8l-macro-is-usm-lens/specification.html> (no confundir con su hermano pequeño el Canon EF 100 mm f/2.8 Macro USM sin la L ni estabilizador IS).

Se compone de 15 elementos en 12 grupos, mide 123 mm de largo y tiene una distancia mínima de enfoque de 30 cm con magnificación 1:1. Procedemos a su análisis como en los casos anteriores, empezando por el enfoque a infinito.

La [figura 4.20](#) muestra la posición de las lentes para enfoque infinito y el cálculo del foco imagen $F' = 162.90$ mm mediante trazado de rayos.

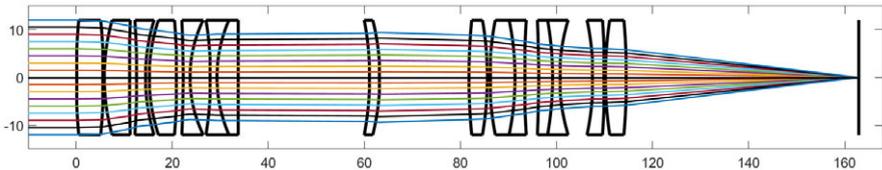


Figura 4.20: Foco imagen F' del Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM para $m = 0$ (enfoque infinito).

La montura EF de Canon tiene una distancia de registro de 44 mm para poder tener espacio para el espejo más resto de elementos de conexión entre objetivo y cuerpo. Compara con los casos previos analizados para monturas sin espejo RF de Canon 20 mm o X de Fuji 17.7 mm.

Canon ha sacado en 2021 una versión de este objetivo para su montura RF. Mide 2.5 cm más de largo y pesa casi 100 g más, pero a cambio consigue una magnificación $|m| = 1.4$ a una distancia mínima de enfoque de 26 cm. Este es otro ejemplo donde salen a relucir las ventajas de diseñar objetivos sin tener que hacer hueco al espejo.

La [figura 4.21](#) muestra el cálculo del segundo punto principal $H' = 62.90$ mm y la focal $f = F' - H' = 162.90 - 62.90 = 100$ mm que coincide con los 100 mm del nombre del objetivo (por fin un objetivo que sí coincide su focal con el valor comercial).

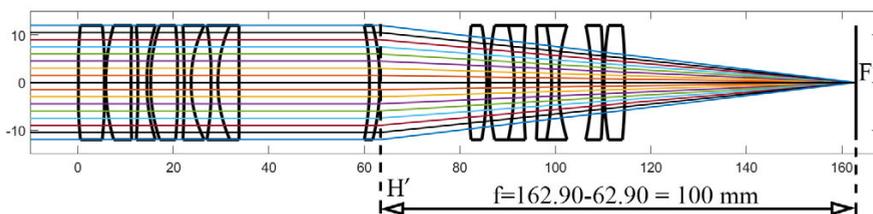


Figura 4.21: Distancia focal del Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM para $m = 0$ (enfoque infinito).

Trazando rayos de derecha a izquierda obtenemos $F = -18.21$, $H = 81.79$ mm. Destaca que el foco objeto cae delante del objetivo. La distancia entre F y H vuelve a dar los 100 mm de la focal del objetivo.

Este objetivo es macro, lo que significa que es capaz de obtener grandes magnificaciones. La máxima magnificación es $|m| = 1$, que se consigue enfocando a la distancia mínima de enfoque $S_{min} = 30$ cm. Primero vamos a ver qué ocurre en el interior del objetivo cuando pasamos de enfocar a infinito a 30 cm.

La **figura 4.22** muestra la disposición para enfoque infinito (arriba) y enfoque a 30 cm (abajo).

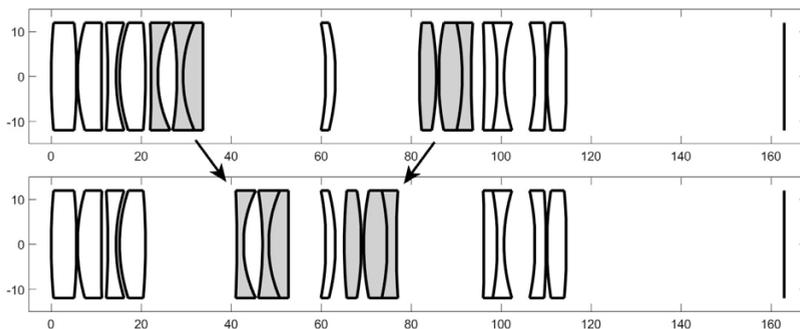


Figura 4.22: Posición de las lentes para $m = 0$ enfoque infinito (arriba) y enfoque $|m| = 1$ (abajo) del Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM.

La diferencia es que hay dos grupos de lentes que se mueven hacia el centro a medida que enfocamos más cerca. Pero ni el grupo delantero ni el trasero se desplazan al cambiar la distancia de enfoque.

Nos queda por calcular los puntos cardinales para el enfoque más cercano. La **figura 4.23** muestra la trayectoria de los rayos que vienen de infinito.

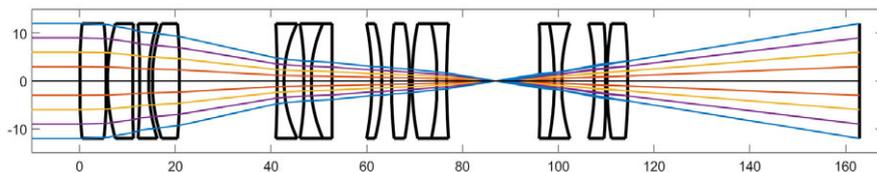


Figura 4.23: Trazado de rayos paralelos para enfoque con $|m| = 1$ del Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM.

He dibujado toda la trayectoria hasta que cortan el sensor para que veas lo grande que es el círculo de confusión que producen los rayos de un objeto en el infinito cuando enfocamos a la distancia más cercana.

Lo que queremos calcular es el valor del foco F' . Para ello hay que trazar hacia atrás los rayos divergentes a la salida del objetivo hasta que cortan el eje. Para verlo mejor, la [figura 4.24](#) muestra una ampliación de la zona de interés (en línea discontinua la prolongación hacia atrás de los rayos a la salida).

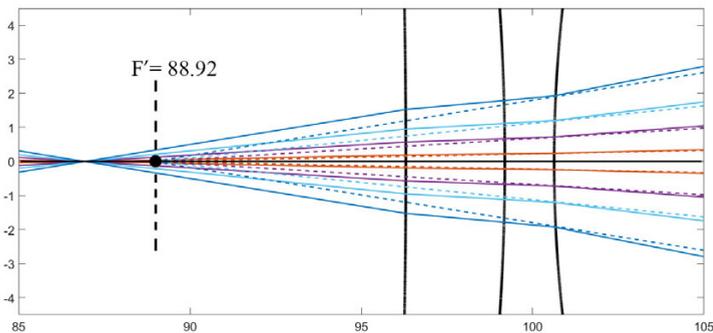


Figura 4.24: Foco imagen F' para enfoque con $|m| = 1$ del Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM.

No hagas caso al punto de corte de los rayos de la izquierda. Como ocurría antes, ese corte se produce mientras los rayos atraviesan el objetivo. El foco imagen viene dado por el punto de corte de la derecha, que se obtiene de prolongar hacia atrás los rayos a la salida del objetivo. El resultado es $F' = 88.92$ mm.

La [figura 4.25](#) muestra el cálculo gráfico del segundo punto principal para este caso y la correspondiente distancia focal.

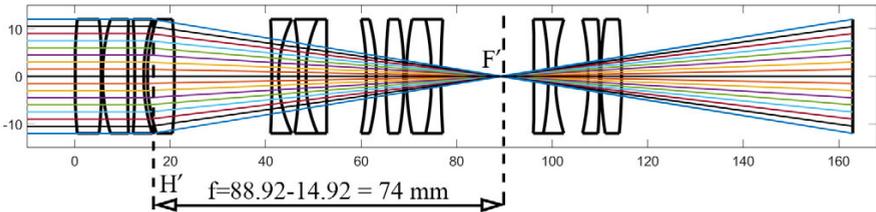


Figura 4.25: Distancia focal para enfoque con $|m| = 1$ del Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM.

El resultado es $H' = 14.92$ mm y por tanto $f = F' - H' = 88.92 - 14.92 = 74$ mm. Vaya sorpresa. La distancia focal cuando enfocas a la distancia más cercana (máxima magnificación $|m| = 1$) es de 74 mm, no 100 mm como sugiere el nombre del objetivo y que solo se cumple para enfoques infinitos. Es decir, a medida que aumenta la magnificación disminuye la distancia focal. Este fenómeno es muy habitual en todos los objetivos macro. Es la forma que tienen de conseguir magnificaciones grandes sin tener que extender el objetivo.

Comprobemos que se cumple lo que muestra la [figura 4.19](#) cuando el objetivo cambia de una focal f a otra menor $f' = f - \Delta f$ al enfocar más cerca: la distancia de F' al sensor $162.92 - 88.92 = 74$ mm coincide con la extensión extra por enfocar más cerca $f'|m| = 74 \cdot 1 = 74$ mm.

Por completar el análisis, los valores de los otros puntos cardinales son $F = -60.75$ $H = 13.25$ mm. La distancia entre planos principales $\overline{HH'} = 14.92 - 13.25 = 1.67$ mm.

La distancia mínima de enfoque se calcula de manera habitual a partir de los datos obtenidos:

$$S_{min} = 74 \left(\frac{1}{1} + 1 \right) + 1.67 + 74(1 + 1) = 297.67 \quad (4.4)$$

La distancia mínima de enfoque calculada $S_{min} = 297.67$ mm coincide con la especificada por Canon de 30 cm.

Por último, comprobemos que es cierto que el objetivo enfoca un objeto situado a esa distancia. El sensor está a 162.92 del primer vértice, así que la distancia al objeto desde la primera superficie vale $162.92 - 297.67 = -134.75$ mm, es decir, hay unos 13.7 cm de distancia de trabajo (el hueco que tienes entre el objetivo y el objeto fotografiado cuando la magnificación vale $|m| = 1$).

La [figura 4.26](#) muestra el trazado de rayos para un objeto situado a esa distancia.

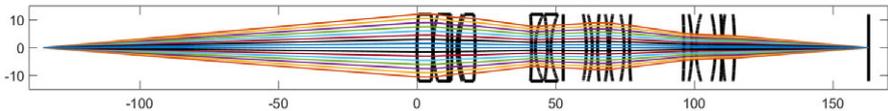


Figura 4.26: Imagen para enfoque con $|m| = 1$ del Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM.

Pues resulta que sí, que si colocas un objeto situado a 13.7 cm por delante del objetivo, obtendrás una imagen nítida invertida del mismo tamaño en el sensor.

Un aspecto relacionado con este sistema de enfoque es lo que se llama respiración del enfoque (focus breathing). Imagina que quieres grabar un vídeo usando este objetivo. Empiezas enfocando a un objeto que está muy alejado y luego quieres cambiar el enfoque a un elemento cercano a 30 cm.

Al girar el anillo de enfoque, como la focal va disminuyendo, el ángulo de visión irá aumentando, lo que provocará que el objeto cercano vaya cambiando de tamaño así como el encuadre, pudiendo provocar rechazo en el observador. Las lentes que se comportan así se dice que respiran. El tema es más complejo de lo que parece porque el ángulo de visión también cambia con la magnificación. En el siguiente tema en la [subsección 5.8.3](#) analizamos el focus breathing.

En resumen, ¿qué está haciendo realmente este objetivo macro? Está usando el cambio de distancia focal para conseguir enfocar más cerca. Más interesante todavía, se está comportando como un zoom: cambiando la posición de las lentes está cambiando la distancia focal. Así que vamos a estudiar los zooms para completar los ejemplos de objetivos.

4.5 Objetivos zoom

Un objetivo zoom es aquél que permite variar la distancia focal y con ello el ángulo de visión, frente a los objetivos de focal fija. La principal ventaja de un objetivo zoom es que permite al fotógrafo ajustar el campo de visión sin tener que moverse (la perspectiva no cambia porque hagas zoom; solo cambia si te mueves).

Hay que distinguir dos casos: aquéllos que mantienen el foco mientras cambia la distancia focal (objetivo parfocal) y los que no (objetivo varifocal). Hablando con propiedad solo los parfocales serían zooms. Si haces vídeo esta variable es importante (mantener el foco mientras haces zoom sin tener que ir reajustando el enfoque continuamente).

Como este libro es principalmente para fotografía, aceptamos todos como zooms entre otras cosas porque la mayoría de los zooms que usamos son varifocales. Además, en la actualidad, con la mejora de los sistemas de autofocus tanto en velocidad como precisión, la

diferencia parfocal varifocal se reduce a efectos prácticos. El Canon 17-40 f/4 y el Nikon 24-70 f/2.8 AF-S son ejemplos de lentes parfocales.

Los zooms tienen dos anillos: el anillo de enfoque para cambiar la distancia de enfoque y el anillo de zoom para cambiar la focal. Si la lente es parfocal, hay grupos de lentes dedicados a tareas diferentes: un grupo para el zoom y otro para el enfoque. Se mueven independientemente y así consiguen mantener el foco mientras cambias de focal. Si es varifocal hay lentes que son compartidas por los dos sistemas, con lo que al hacer zoom se pierde el foco.

Como no hemos visto todavía ningún objetivo con distancia focal grande, a continuación analizamos dos zooms teleobjetivos 70-200 mm. En el tema siguiente veremos algún zoom angular.

4.5.1 Sony FE 70-200 mm F2,8 GM OSS

El teleobjetivo típico en fotografía es el 70-200 mm. En este caso vamos a analizar uno de los más caros en el mercado, el Sony FE 70-200 mm F2.8 GM OSS <https://www.sony.es/electronics/camaras-objetivos/sel70200gm>.

En el 2021 Sony ha sacado una nueva versión FE 70-200mm F2.8 GM OSS II con otro diseño; observa la sutileza para distinguir versiones con el II al final indicando la segunda generación (es habitual usar números romanos para diferenciar versiones de un objetivo). El que analizamos es el del 2016 (cuando escribo esto no he encontrado los datos del II).

Se compone de nada y más y nada menos que 23 lentes en 18 grupos. Su longitud es 20 cm.

La **figura 4.27** muestra el trazado de rayos para enfoque a infinito para las distancias focales $f = 74$ (arriba), $f = 118$ (medio) y $f = 194$ (abajo) mm.

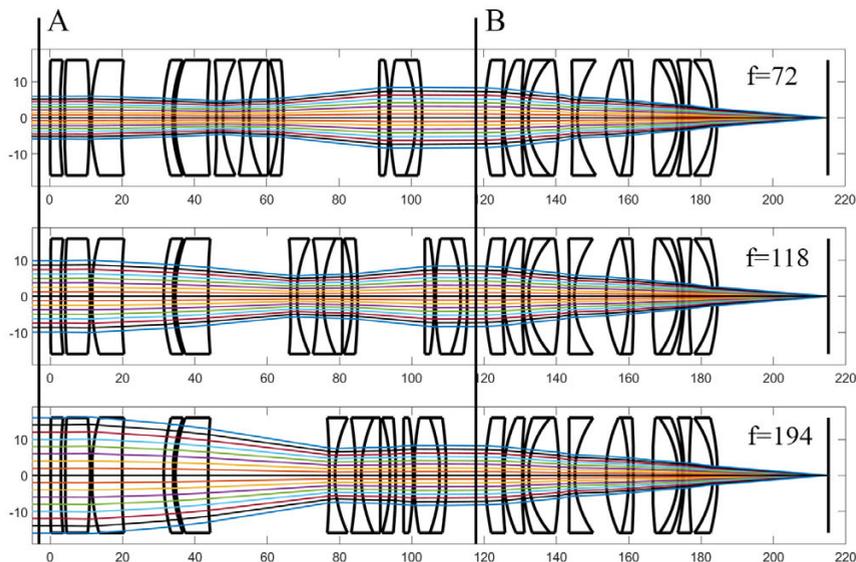


Figura 4.27: Enfoque infinito del Sony FE 70-200 mm F2.8 GM OSS para $f = 74$ (arriba), $f = 118$ (medio) y $f = 194$ (abajo) mm.

Como vemos en la figura, en los tres casos el plano imagen coincide con el sensor, con lo que obtenemos una imagen nítida. Es un objetivo que no cambia su tamaño cuando cambias de focal. La montura E de Sony tiene una distancia de registro de 18 mm.

Fíjate en qué lentes se mueven a medida que giras el anillo del zoom del objetivo. Hay dos grupos que se desplazan según la focal. El primero se aleja de los elementos frontales a medida que aumentas la focal. El segundo hace una trayectoria parabólica, se aleja a 118 mm y se vuelve a acercarse a 194 mm.

La misión de dichos desplazamientos es la siguiente. He marcado el plano de rayos de entrada A y un plano intermedio B. Fíjate que en B la altura de los rayos es la misma para las tres focales y que los rayos son casi paralelos, es decir, como si viniesen de infinito también.

Sin embargo, en A no tienen la misma altura. El haz más pequeño en A es el de arriba para $f = 72$ mm, el intermedio es el del medio $f = 118$ mm y el más grande el de abajo $f = 194$ mm: cuanto más zoom haces más grande ves las cosas y por tanto un objeto del mismo tamaño produce un haz de mayor altura cuando incide en el objetivo.

Es decir, los grupos de lentes que se mueven tienen la misión de cambiar el tamaño del haz de entrada para que todo lo que hay detrás de B se dedique a enfocar independientemente de la distancia focal que esté siendo usada. Realmente hay una lente (la lente con vértice de la primera superficie en 144 mm, es esférica) que también se mueve un poco según la focal usada; en la figura resulta imperceptible su movimiento.

La [figura 4.28](#) muestra los puntos cardinales para cada distancia focal analizada (he incluido de fondo el objetivo para que te hagas una idea de dónde caen los puntos respecto al objetivo).

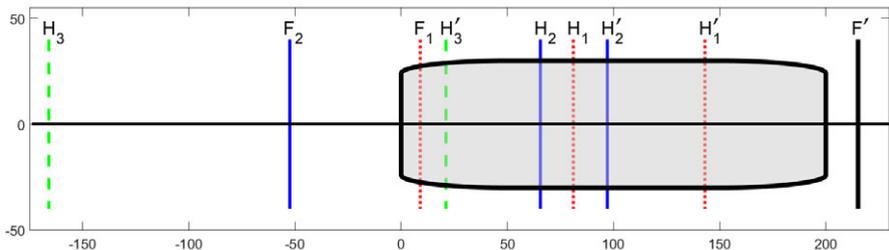


Figura 4.28: Puntos cardinales del Sony FE 70-200 mm F2.8 GM OSS para $f_1 = 74$ (línea de puntos), $f = 118$ (línea continua) y $f = 194$ (línea discontinua) mm.

Como el enfoque es a infinito, en todos los casos el foco trasero coincide con la posición del sensor $F' = 215.17$ mm. Para $f = 72$ mm tenemos $F_1 = 9$, $H_1 = 81.11$, $H'_1 = 143.05$ mm.

Para $f = 118$ mm tenemos $F_2 = -52.43$, $H_2 = 65.57$, $H'_2 = 97.11$ mm (al aumentar la distancia focal el plano H'_2 se separa más del sensor).

Para $f = 194$ mm valen $F_3 = -359.93$, $H_3 = -165.89$, $H'_3 = 21.12$ mm (F_3 está muy por delante del objetivo a la izquierda de H'_3 , por eso no sale en la [figura 4.28](#)).

4.5.2 Nikon Nikkor Z 70-200mm f/2.8 VR

La versión Nikon del teleobjetivo 70-200 mm para su montura sin espejo Z es el Nikkor Z 70-200mm f/2.8 VR S, https://www.nikon.es/es_ES/product/nikkor-z-lenses/auto-focus-lenses/fx/zoom/nikkor-z-70-200mm-f-2-8-vr-s.

Es un objetivo con sistema de enfoque interno, longitud 220 mm y se compone de 21 elementos en 18 grupos. Como ocurre con la mayoría de objetivos de gama alta diseñados hoy día, el vídeo cada vez tiene más importancia. En este caso la web de Nikon dice explícitamente que el objetivo es silencioso, incluye una escala de profundidad de campo y el focus breathing prácticamente desaparece.

La web de Nikon informa que la distancia mínima de enfoque vale 50 cm a $f = 70$ mm, 63 cm a $f = 85$ mm, 80 cm a $f = 135$ mm y 100 cm a $f = 200$ mm. También dice que la máxima magnificación es $|m| = 0.2$. Obviamente esa magnificación será el caso de máxima distancia focal 200 mm y enfoque más cercano 1 m.

En este caso sí tengo datos técnicos de enfoques a infinito y enfoques cercanos.

La **figura 4.29** muestra una comparativa entre el enfoque a infinito (arriba) y el enfoque a la distancia más cercana (abajo) para el caso del anillo de zoom girado a la posición de mayor ángulo de visión (en teoría $f = 70$ mm).

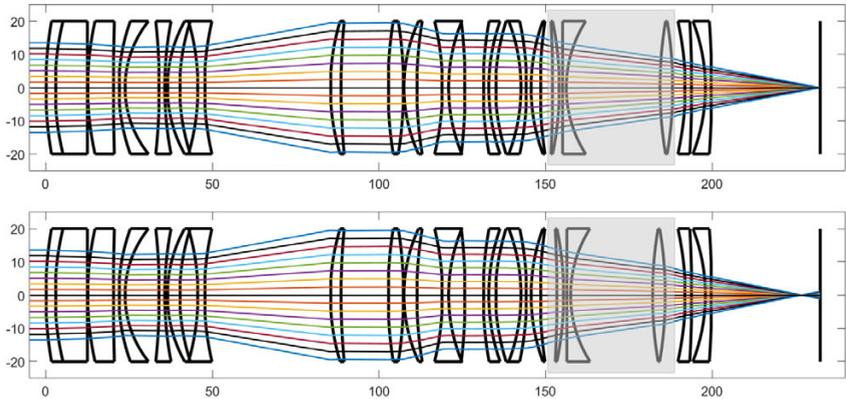


Figura 4.29: Trazado de rayos del Nikon Nikkor Z 70-200mm f/2.8 VR para $f = 70$ mm enfoque infinito (arriba) y enfoque más cercano (abajo).

He enmarcado las tres lentes que se mueven internamente cuando cambias la distancia de enfoque para este caso.

Como la figura de arriba corresponde al caso de enfoque a infinito, el foco imagen $F' = 232.44$ mm coincide con el plano imagen y con la posición del sensor. El tamaño del objetivo es 220 mm y la distancia de registro de la montura Z de Nikon es 16 mm.

Para la figura de abajo, al acercarse el enfoque, la imagen se aleja del foco imagen. El foco imagen obtenido a partir del trazado de rayos de la figura vale $F' = 226.87$ mm. Sabemos de la teoría que el plano imagen se aleja una distancia $f|m|$ por detrás del foco imagen cuando enfocas a una distancia tal que la magnificación es $|m|$. De la figura obtenemos que la extensión vale $232.44 - 226.87 = 5.56$ mm.

Pero antes de aplicar la fórmula hay que saber si la focal cambia cuando pasamos de enfocar a infinito a la distancia mínima.

Siguiendo el método de trazado de rayos habitual, obtenemos $f = 71.50$ mm para enfoque infinito y $f = 66.84$ mm para enfoque más cercano. Así que para el caso más cercano tenemos $f|m| = 5.56$ y sustituyendo $f = 66.84$ obtenemos la magnificación $|m| = 0.0832 = 1/12$.

Veamos el caso de máximo zoom (focal teórica 200 mm). Para enfoque infinito, la focal realmente vale $f = 196$ mm; para enfoque cercano $f = 133$ mm, una reducción del 33% del teórico 200 mm, (ver [figura 4.30](#)).

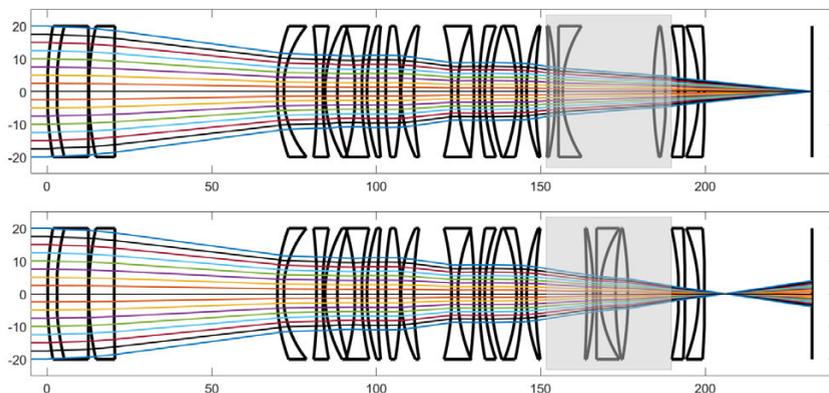


Figura 4.30: Trazado de rayos del Nikon Nikkor Z 70-200mm f/2.8 VR para $f = 200$ mm enfoque infinito (arriba) y enfoque más cercano (abajo).

En este caso, al pasar de enfocar a infinito a la distancia más cercana, el desplazamiento de las lentes es mayor hasta juntarse.

El foco para el enfoque más cercano se aleja más todavía del plano imagen que en el caso $f = 70$ mm, pues estamos usando una mayor distancia focal $f = 200$ mm y por tanto una mayor magnificación.

El valor obtenido de la figura es $F' = 206.00$ mm. La extensión vale $232.44 - 206.00 = 26.44$ mm. Necesitamos el valor exacto de la focal para el enfoque más cercano para poder calcular la magnificación. El valor obtenido es $f = 133.28$ mm. De aquí obtenemos $|m| = 26.44/133.28 = 0.1984$ que es el 0.2 que indica la descripción técnica del objetivo en la web de Nikon.

En cuanto a la distancia mínima de enfoque, previamente calculamos el resto de puntos cardinales. De dichos valores obtenemos $\overline{HH'} = 72.72 - 38.29 = 34.43$. Con todos estos datos, tenemos:

$$S_{min} = 133.28 \left(\frac{1}{0.1984} + 1 \right) + 34.43 + 133.28(1 + 0.1984) = 999.2 \quad (4.5)$$

es decir, el metro que dice Nikon en su web.

Por último, observa comparando la [figura 4.29](#) con la [figura 4.30](#) lo que cambia cuando haces zoom. Las tres primeras lentes están fijas, pero las siguientes se desplazan en grupos. La función es la misma que vimos para el Sony, cambiar el tamaño del haz de entrada. Así pues, hay un grupo delantero de lentes dedicadas a controlar la magnificación (la distancia focal del zoom) y otro trasero que se encarga de ajustar el enfoque según la distancia de enfoque.

4.6 Autofocus

La distancia de enfoque se puede seleccionar manualmente o de manera automática. El sistema de enfoque automático de la cámara se llama autofocus AF (autoenfoque). El cuerpo utiliza la luz que entra a través del objetivo para estimar la distancia de enfoque. Una vez estimada la distancia de enfoque el cuerpo manda las señales necesarias para que el anillo de enfoque se ajuste de manera correspondiente.