

A través d'un objectiu



Sara Lumbreras Navarro
Tutor: Manel Aula
Curs: 2014/15

Índex

0. Introducció.....	2
1. Fites en el desenvolupament de la fotografia.....	3
1.1 Primers passos.....	3
1.1.1 Heliografia.....	3
1.1.2 Daguerreotip.....	3
1.2 Fotografia en color.....	4
1.3 Les primeres càmeres digitals.....	5
2. Elements d'una càmera fotogràfica.....	6
2.1 Objectiu.....	6
2.1.1 Estenopeica (pinole).....	6
2.1.2 Amb una lent.....	7
2.1.3 Sistemes compostos.....	7
2.2 Diafragma.....	7
2.3 Obturador.....	8
2.4 Element fotosensible.....	9
2.4.1 Fotografia química.....	10
2.4.2 Sensors digitals.....	10
3. La càmera més simple: fotografia estenopeica.....	11
3.1 La cambra fosca, l'estenop i la càmera estenopeica.....	11
- Experiment 1: mida de l'estenop.....	11
3.2 Experiment 2: construcció d'una càmera estenopeica.....	14
3.3 Utilització de la càmera estenopeica.....	16
3.4 Experiment 3: temps d'exposició segons la quantitat de llum.....	17
4. Millorar la càmera amb lent.....	21
4.1 Característiques de les lents-objectius: distància focal i obertura relativa.....	21
4.2 Enfocament i profunditat de camp.....	23
- Experiment 4 : estudi de la profunditat de camp.....	26
5. Problemes introduïts per una lent.....	30
5.1 Aberracions monocromàtiques.....	30
5.1.1 Aberració esfèrica.....	30
5.1.2 Distorsió.....	31
- Experiment 5: distorsió en una lent.....	31
5.1.3 Coma.....	32
- Experiment 6: observació del coma.....	33
5.1.4 Astigmatisme.....	34
5.2 Aberració cromàtica.....	34
- Experiment 7: aberració cromàtica.....	35
6. Conclusions.....	37
7. Bibliografia.....	38

0. Introducció

Avui dia estem acostumats que cadascú de nosaltres tinguem més d'una càmera de fotos: la del mòbil, la webcam, la càmera compacta o la càmera rèflex. Les càmeres digitals han evolucionat en molt poc temps. La primera càmera digital que vam comprar a casa era una Samsung digimax 50 duo. Les seves característiques tècniques són les següents: càmera amb què es poden fer unes 100 fotos; les imatges que no les pots veure a l'instant, cal esperar-se a descarregar-les a l'ordinador; el que tu veus pel visor no és el que realment surt a la foto i la resolució de les imatges és d'uns tres-cents mil píxels. Dir que una càmera d'aquestes característiques és obsoleta seria tenir una gran consideració envers aquesta càmera. En dotze anys no només ha millorat la qualitat de les imatges sinó que la mida de les càmeres i el preu d'aquestes ha disminuït notablement. La meva generació ha estat testimoni d'aquesta evolució.

Des de ben petita he pogut fer servir les càmeres de fotografies i sempre m'havia intrigat com es forma i recull la imatge. A primer d'ESO ens van ensenyar com amb una capsa tancada que tingui un petit forat en un costat es pot formar imatges invertides de la realitat. A més a més, si afegim una lent a aquest aparell, la imatge que es forma és molt més nítida. Observar el funcionament de la cambra fosca em va ajudar a entendre com es formen les imatges. L'òptica és una part de la física que m'agrada especialment i fer un treball de recerca on pogués investigar sobre les lents i la formació d'imatges era l'excusa per aprofundir més sobre el tema. També el que em va motivar per fer aquest treball de recerca era pensar que la part pràctica seria visual, amb experiments accessibles i resultats sorprenents.

El treball tracta sobre la formació d'imatges en una càmera de fotos centrant-me principalment en la importància del paper que juguen els elements òptics. De forma més concreta, els objectius del meu treball són: construir una càmera de fotos que funcioni, il·lustrar de la manera més entenedora el paper dels objectius en una càmera i mostrar experimentalment els problemes que poden presentar la utilització de lents. Els experiments haurien de fer-se amb aparells o materials que no siguin gaire difícils de trobar. El principal objectiu de la meva recerca és trobar un experiment que pogués il·lustrar la informació teòrica recollida per tal de mostrar, de manera visual, els conceptes que s'expliquen.

1. Fites en el desenvolupament de la fotografia

1.1 Primers passos

1.1.1 Heliografia

Joseph Nicéphore Niépce va ser un químic, litògraf i científic i la primera persona que va aconseguir fer una fotografia. Les primeres imatges daten de l'any 1816 encara que cap d'elles s'ha conservat. Se sap que eren fotografies en paper i en negatiu. Niépce no va quedar content amb aquests resultats i va abandonar aquesta línia d'investigació per intentar fer una fotografia en positiu. Va demanar ajuda a l'òptic Charles Chevalier per poder perfeccionar els seus experiments. L'any 1826 va aconseguir els resultats que buscava i va fer la primera fotografia en positiu. Aquesta fotografia va necessitar vuit hores d'exposició. Va utilitzar un procés que fins aleshores no s'havia utilitzat i el va anomenar heliografia (del grec ἥλιος, helios, "sol", i γραφία, grafia, "escriptura"). Aquest era un procés que consistia en fotografies de positiu directe. El mètode utilitzat tenia els passos següents: en una placa de peltre (aliatge de zinc, estany i plom) s'estenia un vernís fet amb betum de Judea dissolt en oli essencial d'espígol. Posteriorment s'exposava la placa a la llum de la cambra fosca i després es netejava en un dissolvent d'oli d'espígol i d'oli de petroli perquè es pogués apreciar la imatge.



Figura 1: primera foto de la història
<http://www.fotografia101.com>

1.1.2 Daguerreotip

Louis Jacques Mandé Daguerre va ser el pare del daguerreotip. El daguerreotip és un procés pel qual s'obté una imatge en positiu a partir d'una placa de coure recoberta de iodur de plata. Després de ser exposat a la llum, la imatge latent es revelava amb vapors de mercuri, el resultat era una imatge finament detallada amb una superfície delicada que havia de protegir-se de l'abradió amb un vidre i tancar-ho per evitar que s'ennegrís per contacte amb l'aire.

Aquest va ser el primer procés fotogràfic amb una aplicació pràctica. Va ser un dels procediments més importants de la història de la fotografia. Els experiments de Louis Daguerre es van basar a perfeccionar els que ja va fer prèviament Nicéphore Niépce.

Inicialment aquesta tècnica no era excessivament sensible a la llum i el temps d'exposició podia arribar als 30 minuts, però després d'uns considerables avenços els temps d'exposició es van poder reduir. A començaments dels anys 1840 la major part de les capitals tenien com a mínim un estudi de fotografia.

Louis Daguerre va prescriure com havia de ser la lent de la seva càmera com: "l'objecte de vidre hauria de ser acromàtic i periscòpic (que la part cònca hauria d'estar a la part per fora de la cambra fosca), el seu diàmetre ha de ser de vuitanta-un mil·límetres, i el seu focus de trenta-vuit centímetres. El diafragma està col·locat davant de la lent ja descrita, a una distància de seixanta-vuit mil·límetres, i la seva apertura, la qual es tanca amb una placa i un cargol, és de vint-i-set mil·límetres."



Figura 2: càmera utilitzada per Louis Daguerre
<http://www.elperiodico.com/>



Figura 3: Primera foto que va fer Louis Daguerre
<http://www.fotografia101.com>

1.2 Fotografia en color

La primera fotografia en color la va fer el físic escocès James Clerk Maxwell. El seu objectiu era demostrar que qualsevol color es pot obtenir barrejant llums dels tres colors primaris (vermell, verd i blau). Ho va aconseguir fent passar la llum per filtres de colors i projectant aquest resultat en una pantalla, aquest sistema va rebre el nom de tricromia.

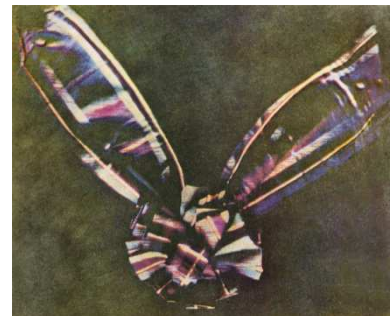


Figura 4: primera fotografia en color feta a l'any 1861
<http://www.fotografia101.com>

1.3 Les primeres càmeres digitals

La primera càmera digital va néixer a Kodak, una companyia que es dedicava a la producció i comercialització d'equipament fotogràfic. Steve Sasson, un enginyer de l'empresa, intentava trobar una càmera que no utilitzés pel·lícula. Va unir diverses parts que no tenien gaire a veure entre si però finalment va esdevenir la primera càmera digital de la història l'any 1975. La càmera constava d'una lent d'una càmera Super 8 (una gravadora de dades instrumentals a casset), un sensor CCD (Charge-coupled Device) que s'havia inventat el 1973 per la companyia Fairchild Semiconductor, cables i circuits. La càmera pesava tres quilos i mig i tenia una resolució de 0,01 megapíxels, és a dir, 10.000 píxels. Donades aquestes característiques es trigava 23 segons a gravar una imatge i 23 més a reproduir-la. La càmera no tenia pantalla i per això la reproducció d'imatges havia de fer-se amb un altre dispositiu.



Figura 5: primera càmera digital
<http://www.fotoactualidad.com/>



Figura 6: una de les primeres fotografies digitals
<http://www.seanlahman.com/2012/02/digital-camera-pioneers/>

La primera càmera fotogràfica completament digital va ser el model DS-1P de Fuji el 1988, que gravava en una targeta de memòria interna de 16MB i utilitzava una bateria per mantenir les dades a la memòria. Però aquesta càmera no es va posar a la venda.

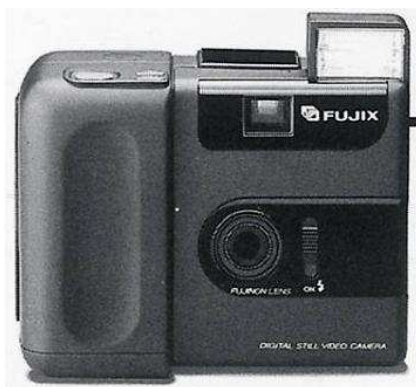


Figura 7: Càmera DS-1P Fuji
http://camerapedia.wikia.com/wiki/Fujix_DS-1P

2. Elements d'una càmera fotogràfica

Una càmera fotogràfica, tant analògica com digital, està formada per:

- Element fotosensible
- Visor
- Objectiu
- Diafragma
- Obturador
- Disparador
- Flaix

De totes aquestes parts he centrat l'interès de la recerca en: l'objectiu, el diafragma l'obturador i els diferents tipus de materials fotosensibles.

2.1 Objectiu

Totes les càmeres tenen objectius complexos formats per diverses lents algunes d'elles convergents i d'altres divergents per tal de poder aconseguir que se'ns formi una imatge en un pla que és on se situa el material fotosensible o sensor que captarà la imatge. A continuació parlarem dels diferents tipus.

2.1.1 Estenopeica (pinhole)

El sistema òptic més simple per formar una imatge és un petit forat en un material opac. Els raigs procedents de l'exterior passen pel forat formant una imatge invertida a l'altra banda d'aquest. El forat que fem ha de tenir unes dimensions reduïdes per tal que la imatge no surti desenfocada. En el cas que tot estigui ben fet la imatge formada presenta aquests avantatges: no està desenfocada i no té aberració cromàtica. Però presenta una sèrie d'inconvenients que són els següents: la imatge pot presentar vinyetatge, un enfosquiment de les vores d'aquesta, i el temps d'exposició és relativament llarg. Això suposa que, si durant aquest temps l'objecte que es vol fotografiar estigués en moviment, la fotografia sortiria moguda.

Per resoldre aquest problema el que podem fer és engrandir el forat però a mesura que l'anem fent-lo gran ens trobem amb un altre problema i és que la imatge que es forma està desenfocada. Per poder solucionar aquests problemes hem d'afegir al sistema un element que ens permeti concentrar la llum en un punt. Aquest element el coneixem amb el nom de lent.

2.1.2 Amb una lent

Una lent es defineix com un sistema òptic de dues o més interfícies refractants on com a mínim una d'elles sigui corbada. Les lents poden ser convexes (lents que són més gruixudes per la part central) o bé còncaves (lents que són més primes per la part central). Per poder fabricar un objectiu d'una càmera de la manera més simple només cal una lent convexa. Els raigs de llum que travessen paral·lelament una lent d'aquest tipus s'ajunten en un mateix punt anomenat focus. Aquests raigs arriben a una superfície capaça de captar la llum i formar la imatge.

Les lents, però, no són perfectes. En termes d'òptica geomètrica, Maxwell va suggerir tres condicions perquè una lent ho fos:

- a. Tots els raigs des d'un punt d'un objecte es troben en el mateix punt de la imatge.
- b. Tots els punts situats en un pla perpendicular a l'eix òptic generen la seva imatge en un altre pla perpendicular a l'eix òptic.
- c. Les mides de la imatge han de ser proporcionals a les de l'objecte.

En la realitat una lent que compleixi aquestes tres característiques alhora no existeix. Les lents simples pateixen aberracions que empitjoren si la qualitat és molt baixa. La manera de corregir les limitacions de les lents és afegint altres lents al sistema.

2.1.3 Sistemes compostos

Els objectius formats per sistemes compostos són tots aquells que estan formats per dues o més lents simples de diferents mides i materials amb diferents índexs de refracció. Aquestes lents es troben endreçades una darrera l'altra en un mateix eix anomenat eix òptic. Els sistemes compostos s'utilitzen per corregir aberracions òptiques que presenta un objectiu amb una lent i així aconseguir fotografies el més semblant possible a la realitat. Els sistemes més simples són els doblats cromàtics, utilitzats per corregir l'aberració cromàtica (que s'explica en l'apartat 4.4).

2.2 Diafragma

El diafragma d'una càmera és una estructura primeta i opaca, amb una obertura al centre que s'encarrega de deixar passar la quantitat de llum suficient perquè es pugui formar la imatge. Normalment és un disc o sistema d'aletes que està situat a l'objectiu

d'una càmera amb el que es pot regular l'entrada de llum, el centre d'aquest coincideix amb l'eix òptic del sistema de lents.

El diafragma va lligat amb la lluminositat que és la capacitat que té un objectiu de deixar passar la llum. En fotografia, per expressar aquesta lluminositat s'utilitza número f (relació focal). Aquest número es defineix com la divisió entre la distància focal de l'objectiu pel diàmetre d'obertura. Aquesta relació dóna lloc a una escala normalitzada en progressió de: $\sqrt{2}$ multiplicat pel resultat anterior. De manera que per facilitar els càlculs de la quantitat de llum els números f que s'utilitzen són: 1; 1'4; 2; 2'8; 4; 5'6; 8; 11; 16; 22; 32; 45 ... Com és gran és el número f més tancat està el diafragma. El salt que hi ha d'un número a l'altre s'anomena pas. D'un pas a l'altre (per exemple de 8 a 11) la quantitat de llum que entra es divideix a la meitat. Tornarem a parlar d'aquest concepte a l'apartat 4 quan parlem de les propietats de les lents, però en aquest cas com obertura relativa.

2.3 Obturador

L'obturador és el dispositiu que controla la quantitat de temps que està entrant llum al material fotosensible. Consisteix en una petita cortina que s'obre i es tanca situada just davant del sensor.

L'obturador és l'encarregat de regular el temps d'exposició que és el temps que està obert l'obturador. Aquest temps es mesura generalment en segons o fraccions de segon. El més habitual és que en una càmera es puguin seleccionar temps que van des dels 30 segons fins a 1/2000 segons. Les velocitats ràpides serveixen per capturar moviments ràpids i evitarà que la fotografia surti moguda. Les velocitats més lentes ens permetran fer exposicions més llargues però hem d'anar amb compte que la fotografia no quedi moguda o sobreexposada (massa llum).

Les imatges següents s'han fet per veure que passa si canviem el temps d'exposició quan fotografiem el mateix paisatge. Per fer aquesta prova s'ha utilitzat la càmera rereflex i s'ha anat variant el temps d'exposició posant els controls en manual. La sensibilitat amb què s'han fet les fotos és de 100 ISO¹. Perquè les fotos poguessin sortir iguals s'ha utilitzat un trípode per aguantar la càmera i que aquesta no es mogués.

¹La sensibilitat fotogràfica fa referència a la rapidesa en què captem la llum. Per una mateixa escena, sense variar cap altre paràmetre, una pel·lícula poc sensible necessitarà més temps per obtenir el mateix resultat que una pel·lícula molt sensible. Es mesura amb diferents escales, com per exemple ASA, DIN i ISO.



Temps d'exposició: 1/4000 s



Temps d'exposició: 1/2000 s



Temps d'exposició: 1/1000 s



Temps d'exposició: 1/500 s



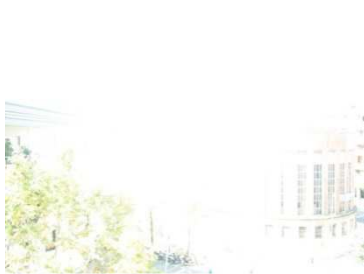
Temps d'exposició: 1/250 s



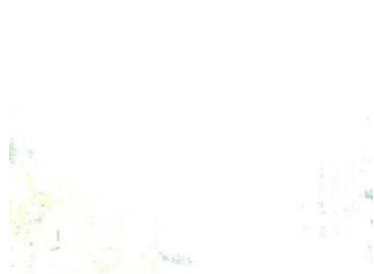
Temps d'exposició: 1/125 s



Temps d'exposició: 1/60 s



Temps d'exposició: 1/30 s



Temps d'exposició: 1/15 s

Figures 8 – 9 – 10 – 11 – 12 – 13 – 14 – 15 – 16: imatges obtingudes amb una càmera rèflex per explicar la funció de l'obturador i el temps d'exposició

Aquestes fotos estan fetes amb diferents temps d'exposició on es pot veure que com més curt és el temps d'exposició més fosca surt la fotografia i com més gran més clara. Els temps d'exposició curts serveixen per fer fotografies els dies més assolellats. Els temps d'exposició més llargs (de més d'un segon) se solen utilitzar en fotografia artística.

2.4 Element fotosensible

L'element fotosensible és l'encarregat d'enregistrar la imatge. Les càmeres analògiques utilitzen rodets de pel·lícula química i les digitals, sensors.

2.4.1 Fotografia química

La fotografia analògica o de rodet, és coneguda també com a fotografia tradicional, argèntica o química. Aquest tipus de fotografia és una tècnica que permet l'obtenció de fotos mitjançant un procés fotoquímic que consisteix a exposar una pel·lícula sensible a la llum.

Les pel·lícules més modernes consisteixen en un suport de plàstic recobert d'una emulsió que és una capa de gelatina sobre la qual es troben suspesos cristalls de bromur de plata.

Quan s'exposa a la llum passa el següent: els fotons que provenen de la part clara de l'objecte fotografiat arriben a la pel·lícula. Per cada fotó absorbit un electró s'allibera i el capta un ió Ag^+ . L'ió Ag^+ es redueix, és a dir, es converteix en un àtom de plata que s'allibera de la xarxa cristal·lina. Per cada cristall, segons la intensitat lluminosa, es formen de zero a una desena d'àtoms de plata. Aquests àtoms tenen la tendència d'agrupar-se per formar un "agregat" o "clúster". Això deixa impresa una imatge que en aquest punt rep el nom d'imatge latent. Aquesta imatge latent passa per una etapa posterior de revelat on es produeixen més àtoms de plata metàl·lica pròxima als clústers anterior augmentant el contrast de la imatge resultant. Finalment, amb un procés de fixació i un últim rentat eliminem les restes de sals de plata que no han reaccionat. Els processos anteriors s'han de fer a les fosques per no alterar la imatge final. Com a resultat s'obté un negatiu estable que podem manipular.

2.4.2 Sensors digitals

Un sensor digital és l'element d'una càmera, tant de vídeo com de fotografia estàtica, que capta la llum que compon la imatge i la converteix en un senyal elèctric. Es tracta d'un xip format per milions de components sensibles a la llum (fotodíodes o fototransistors) que quan són exposats a la llum que ve de l'objectiu la capten i es forma la imatge. Cada un dels elements fotosensibles del sensor es denomina píxel que prové de l'acrònim en anglès **p**icture **e**lement. El nombre total de píxels que té un sensor s'acostuma a mesurar en milions de píxels (Mega). Com més píxels té una càmera major serà la resolució de la imatge. Els píxels que tenen una mida més gran acostumen a tenir una millor qualitat d'imatge i major sensibilitat.

3. La càmera més simple: fotografia estenopeica

3.1 La cambra fosca, l'estenop i la càmera estenopeica

La cambra fosca o cambra obscura és un instrument òptic que consisteix en una caixa tancada en la qual els raigs de llum només hi poden entrar per un petit forat, anomenat estenop, que es troba en la part frontal. Aquest instrument és capaç d'obtenir una imatge real i invertida sobre la seva superfície interior al costat oposat d'on es troba el forat. La cambra fosca va ser un instrument indispensable en la posterior fabricació de les càmeres fotogràfiques. També va ser utilitzada com a ajuda per dibuixar, ja que la imatge que es formava servia com a pauta per dibuixar-hi a sobre.

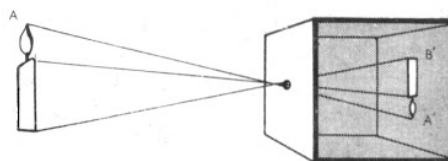


Figura 17: cambra fosca
<http://www.xtec.cat/centres/>

L'estenop, que és el forat de la cambra fosca o el de la càmera estenopeica, actua com un filtre que selecciona una sèrie de raigs als quals deixa continuar la seva trajectòria fins a la pel·lícula o pantalla on es formarà la imatge. Els raigs de llum viatgen en línia recta de manera que la imatge es formarà invertida, el que es trobava a la dreta a l'esquerra, el que es trobava a dalt es trobarà a baix i viceversa.

Els estenops utilitzats en una cambra fosca han de tenir un diàmetre prou gran perquè la llum que entri sigui suficient per poder observar bé la imatge. Si volem fer un estenop per utilitzar-lo en una càmera estenopeica és molt important que el diàmetre sigui el més petit possible, de l'orde de 0'2 a 0'5 mm. El forat es pot fer amb la punta d'una agulla, una xinxeta...

- Experiment 1: Mida de l'estenop

Per destacar la importància de la mida de l'estenop en la càmera estenopeica s'han fet dues proves utilitzant la càmera rèflex on s'ha substituït l'objectiu per estenops de dues mides diferents. Per mesurar el diàmetre ha calgut trobar un mètode precís, ràpid i fàcil.

Per calcular els diferents diàmetres dels estenops necessitem un regle, l'estenop i una càmera digital qualsevol (en aquest cas la d'un mòbil). Amb una miqueta de cinta adhesiva, s'enganxa l'estenop a la regla i es fa una foto on es pugui apreciar el forat i la graduació de la regla (com es mostra a la figura 9). Perquè el forat es pugui apreciar amb més claredat col·loquem l'estenop a la finestra perquè hi passi llum a través.

Aquesta foto la passem a l'ordinador i contem els píxels que hi ha en un mil·límetre i els píxels que té de diàmetre el forat.



Figura 18: Fotografia del forat i la graduació de la regla

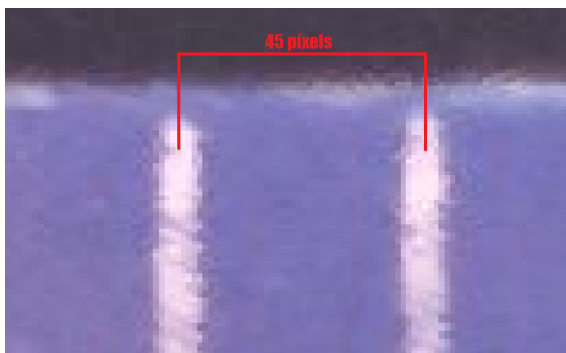


Figura 19: píxels per cada mil·límetre
1 mm = 45 píxels

$$17 \text{ píxels} \times \frac{1 \text{ mm}}{45 \text{ píxels}} = 0'38 \text{ mm}$$



Figura 20: mida del forat de l'estenop
Forat = 17 píxels

Després d'haver mesurat els dos estenops que s'han usat en els experiments hem pogut fer la prova.

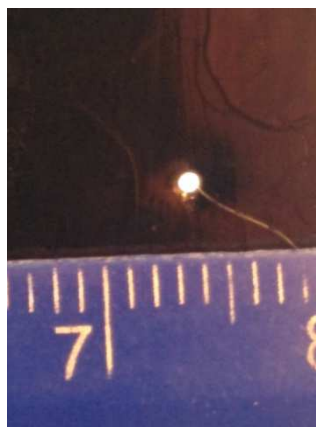


Figura 21: estenop utilitzat en l'experiment
Estenop: 0'85 mm
Àrea: 0,567 mm²



Figura 22: estenop utilitzat en l'experiment
Estenop: 0'34 mm
Àrea: 0,091 mm²

S'ha anat variant els temps d'exposició fent diverses fotografies amb l'estenop petit (0,34 mm) fins a trobar el temps d'exposició adequat. S'ha obtingut el millor resultat per a un temps d'1/3 s. En principi, la relació que hi ha entre les àrees dels estenops és inversament proporcional als temps d'exposició. Una vegada trobat el temps d'exposició per l'estenop petit s'han fet uns càlculs per trobar quin hauria de ser el temps d'exposició del gran, que és d'1/20 s. Per fer la prova s'ha utilitzat una càmera rèflex digital per poder obtenir els resultats de manera immediata i poder variar els temps d'exposició amb major facilitat.

Propietats:
ISO: 400
Temps d'exposició: 1/20
Estenop: 0'85 mm

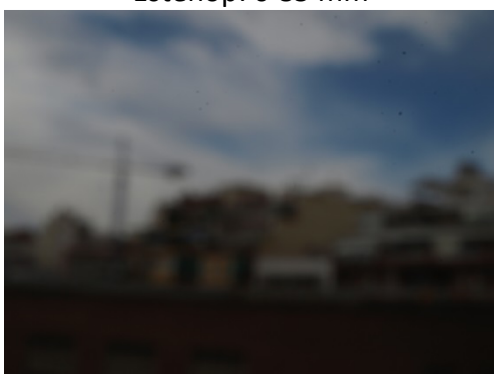


Figura 23: imatge obtinguda amb l'estenop de 0'85 mm

Propietats:
ISO: 400
Temps d'exposició: 1/3
Estenop: 0'34 mm

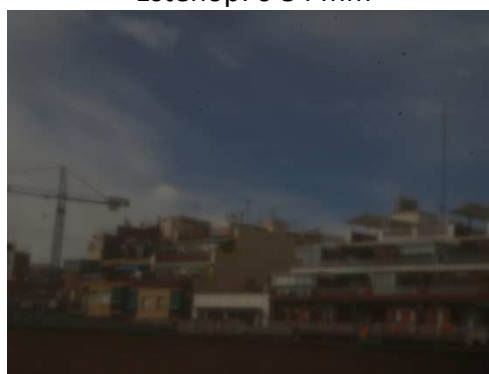


Figura 24: imatge obtinguda amb l'estenop petit de 0,34 mm

Després de fer l'experiment queda clara la importància de la mida de l'estenop. La primera imatge és una imatge poc nítida i difícil d'interpretar tot i que podem distingir alguns objectes del paisatge com ara la grua o els edificis. La segona imatge és molt més nítida que la primera i en aquesta ja hi podem diferenciar amb més detall alguns elements més concrets com ara les finestres dels edificis o els núvols.

El diàmetre del forat ha de ser com més petit millor, com a màxim 0'5 mm per garantir que la imatge és nítida. En alguns casos el forat es pot fer amb un làser, però si es fa el forat massa petit, es pot produir el fenomen de difracció de la llum. La difracció es produeix quan la llum creua un obstacle o una obertura de dimensions de l'ordre o inferiors a la seva longitud d'ona. L'obstacle, en aquest cas, es converteix en un focus emissor d'ones d'igual longitud d'ona que la incident. Amb els estris utilitzats per la construcció d'una cambra estenopeica és impossible fer un forat d'aquestes dimensions per tant aquest inconvenient no ens afecta.

Però el que sí que ens pot passar que el diàmetre d'apertures sigui massa gran i es produeix vinyetatge. El vinyetatge es coneix a la fotografia com un efecte involuntari que el que fa és que les cantonades o vores d'una imatge queden fosques. Aquest fenomen es deu a què arriba menys llum a les vores.

Si volem, també es pot construir una càmera estenopecica a partir d'una càmera rèflex digital. Les avantatges d'això és que els resultats de les fotografies són immediats. Un dels inconvenients és que per fer-ho cal treure l'objectiu de la càmera i col·locar un estri prèviament dissenyat per utilitzar-lo com a estenop. Durant aquest temps el sensor és exposat a la pols de l'exterior.

3.2 Experiment 2: Construcció d'una càmera estenopecica

Per fabricar una càmera estenopecica, utilitzant com a material fotosensible un rodet de fotos, es necessiten els materials següents:

- Unes tisores
- Un bolígraf permanent negre
- Un cúter
- Un regle
- Una llauna de refresc buida
- Cinta aïllant
- Un rodet nou
- Un rodet vell que encara tingui un tros de pel·lícula
- Un tros de plàstic
- Cartolina negra
- Una caixa de llumins buida.

1r pas: separem les dues parts de la capsa de llumins i a la part de dins fem un forat rectangular de 24x24 mm al centre i pintem la part de dins amb el permanent negre. Aquest rectangle serà on estigui el tros de pel·lícula on es captarà la imatge. Per les vores del forat posem una miqueta de cinta aïllant perquè quedi més recte. També tapem les cantonades de la capsa amb més cinta per evitar l'entrada de llum com veiem a la figura.

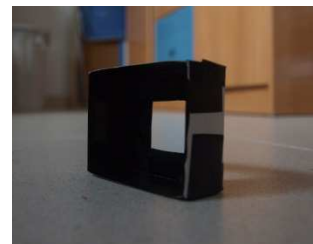


Figura 25: primer pas de la construcció

2n pas: Agafem l'altra part de la capsa i fem un forat centrat de 6x6 mm a la part exterior. La part interior la pintem de negre com ja hem fet amb l'altra part de la caixa. Per les vores del forat posem cinta aïllant.



Figura 26: segon pas de la construcció

3r pas: amb la llauna de refresc retallem un quadrat de 15x15 mm on fem un forat amb la punta d'una agulla primeta per fer l'estenop. Pintem les dues cares del trosset de llauna amb el permanent de negre. Amb cinta aïllant assegurem l'estenop on havíem fet el forat de 6x6 mm perquè aquesta sigui l'única entrada de llum. Amb un tros de cartolina negra retallem un quadrat amb un forat quadrat al centre, ho posem a sobre de l'estenop i amb cinta aïllant tapem totes les cares excepte una, formant una mena de butxaca com es veu a la figura. Amb un altre tros de la mateixa cartolina retallem un rectangle, que ens servirà d'obturador. El posem de tal manera que impedeixi l'entrada de llum excepte quan volem fer el foto.



Figura 27: tercer pas de la construcció

4t pas: amb un tros de plàstic, que pot ser per exemple d'una ampolla, retallem un rectangle allargat i fi i en una de les puntes ho tallem en forma de fletxa. Aquest element ens servirà per poder sentir un soroll de "clic" cada vegada que correm el rodet i així saber quan podem fer la següent foto. Aquest plàstic el fem que la punta coincideixi amb els forats del rodet nou i ho enganxem amb cinta aïllant. Passem el tros que li queda de pel·lícula al rodet que està mig vuit per la caixa de llumins (la meitat de la caixa, figura 28) i amb una miqueta de celo enganxem la punta de la pel·lícula vella amb la nova. Posem la part interior de la caixa de llumins a dins la capsa una altra vegada assegurant-nos que el forat que hem fet de 24x24 mm queda a sobre de la pel·lícula i fa pressió perquè no es mogui. Ha de quedar com a la imatge que veiem a la dreta.



Figura 28: quart pas de la construcció

5è pas: Tapem totes les entrades de llum i recobrim tota la capsa amb cinta aïllant per assegurar-nos que no pugui entrar gens de llum que ens pugui velar la pel·lícula. Hem de tenir en compte que no podem tapar les parts de dalt dels rodets perquè si no després no podem passar la pel·lícula. És recomanable fer alguna marca al lloc on es troba el rodet nou o vell, ja que així no hi haurà confusions a l'hora de fer una altra fotografia.



Figura 29: cinquè pas de la construcció

3.3 Utilització de la càmera estenopeica

Perquè entri la llum i quedi plasmada la imatge al rodet només cal aixecar la cartolina negra que ja hem fet amb la intenció que funcionés com a obturador. Quan vulguem fer una altra fotografia només ens caldrà passar el rodet, igual que en les càmeres analògiques, de manera que la pel·lícula es vagi enroscant en el rodet vell. Això ho podem fer amb ajuda d'unes tisores o la millor manera és trobar alguna cosa, com per exemple la xapeta d'una llauna de refresc, que ens ajudi a anar passant el rodet del nou al vell girant des d'una de les puntes del rodet vell. Per saber quan podem fer una altra imatge hem d'escoltat els clics que faran els forats del rodet gràcies al plàstic que prèviament hem posat en el lloc estratègic. Entre imatge i imatge s'han de sentir sis clics per poder fer-ne una altra i que la nova imatge no alteri la que ja hem fet, però per seguretat és recomanable sentir set clics per si de cas. Una vegada se'ns hagi acabat el rodet i no puguem fer més fotos retirarem la cinta aïllant que recobria la càmera i amb cura retallarem el rodet que queda per dins de la capsa de llumins i, per si la volem reutilitzar, haurem de retallar el rodet nou de manera que ens quedi una miqueta de pel·lícula per poder-lo fer servir com a rodet vell la pròxima vegada que la utilitzem. El rodet que ara tenim amb tota la pel·lícula el podem portar a revelar a una botiga de fotografia però hem de demanar que només volem els negatius. Si les característiques del rodet nou i vell no són les mateixes no importa, ja que en el laboratori de revelat ja saben detectar les propietats de la pel·lícula que hi ha dins. Una vegada tinguem els negatius, es necessita un digitalitzador per poder passar aquests negatius a un ordinador i després fer els positius. Si no tenim digitalitzador podem utilitzar un escàner però ho hem de fer de la manera següent: posem els negatius a sobre de l'escàner i amb l'ajuda d'un vidre els aguantem perquè no es mogui. Amb una làmpada posem llum a sobre dels negatius però perquè no sigui tan intensa posem un paper davant i escanegem. Una vegada tinguem els negatius en format digital a l'ordinador, només caldrà passar-los a positius amb algun programa com per exemple el "IrfanView²".

La qualitat de les imatges digitalitzades amb el digitalitzador són molt millor que les que digitalitzades amb l'escàner.

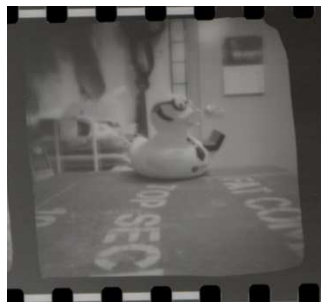


Figura 30: Imatge digitalitzada amb escàner



Figura 31: imatge digitalitzada amb digitalitzadora

² <http://www.irfanview.com/>

3.4 Experiment 3: temps d'exposició segons la quantitat de llum

Una vegada construïda la càmera volem "calibrar" els temps d'exposició segons les condicions de llum que poden donar-se.

Tot i que estem utilitzant una pel·lícula ISO 200 i no necessitem gaire precisió en els temps d'exposició volem determinar quin és el temps més adequat. S'han plantejat quatre possibles escenes amb diferents intensitats de llum. S'ha anat variant el temps d'exposició per cadascun dels casos, en intervals diferents de temps, segons els criteris trobats a la bibliografia. En el cas de temps curts (de l'orde d'un segon, dos...) l'error relatiu en la mesura del temps és gran, a més a més, es podrien haver mogut involuntàriament part de l'escena que podrien haver alterat la imatge. Per evitar aquests errors que es poden haver comès s'han fet diverses rèpliques de cada fotografia. Observant els resultats obtinguts podrem determinar el temps més adequat per fer una fotografia amb la càmera estenoipeica en cada condició.

- Exterior amb sol (temps d'exposició entre 1 segon i 8 segons)
- Exterior ennuvolat (temps d'exposició de 3 segons i 5 segons)
- Interior amb llum natural (temps d'exposició entre 15 segons i 1 minut)
- Interior amb llum artificial (temps d'exposició de 5 minuts i 8 minuts)

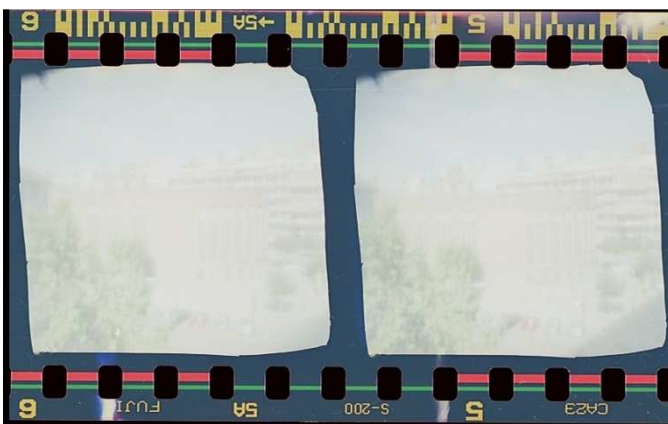
- Exterior amb sol



*Figura 32: imatges obtingudes amb la càmera estenoipeica
Temps d'exposició: 1 s*



*Figura 33: imatges obtingudes amb la càmera estenopeica
Temps d'exposició: 2 s*



*Figura 34: imatges obtingudes amb la càmera estenopeica
Temps d'exposició: 8 s*

En aquestes condicions de llum podem dir que el temps més adequat és el d'1 segon. Temps d'exposició massa llargs, com és el cas de 8 segons, poden cremar la pel·lícula.

- Exterior ennuolat



*Figura 35: imatges obtingudes amb la càmera estenopeica
Temps d'exposició: 3 s*



Figura 36: imatges obtingudes amb la càmera estenoipeica
 Temps d'exposició: 5 s

En aquest cas podem dir que el temps més adequat és el de 3 segons.

- Interior llum natural



Figura 37 – 38 – 39: imatges obtingudes amb la càmera estenoipeica
 Temps d'exposició: 15 s Temps d'exposició: 30 s Temps d'exposició: 1 min

El temps més adequat per fer una fotografia en aquestes condicions és el d'1 minut.

- Exterior llum artificial



Figura 40: imatges obtingudes amb la càmera estenoipeica
 Temps d'exposició: 5 min



*Figura 41: imatges obtingudes amb la càmera estenoipeica
Temps d'exposició: 8 min*

El temps d'exposició més adequat en aquesta situació és de 8 minuts.

4. Millorar la càmera amb una lent

4.1 Característiques de les lents-objectius: distància focal i obertura relativa

La distància focal d'una lent és la distància entre el centre òptic de la lent i el focus (o punt focal). Aquesta propietat que tenen les lents de refractar la llum es mesura en diòptries i es coneix com la potència d'una lent. Les diòptries són la inversa de la seva distància focal en metres. Per exemple: si una lent té una distància focal de 0,04 m (4 cm) té 25 diòptries. Quan les lents són convergents se'ls assigna una potència positiva i negativa a les divergents.

Per calcular la distància focal en una lent s'ha d'utilitzar la fórmula següent:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

On f és la distància focal, n és l'índex de refracció del material de la lent i R_1 i R_2 són els radis de curvatura de les superfícies de la lent. El signe de R_1 i R_2 són positius si els centres de curvatura de la seva superfície es troba a la dreta i negatiu en el cas contrari. Els radis, doncs, determinen el signe d'una lent. Aquesta fórmula només és vàlida quan la lent es troba a l'aire.

Fem servir com a criteri de signes els eixos de

coordenades, és a dir, el que es troba a la dreta de la lent té signe positiu i el que es troba a l'esquerra negatiu. Per tant en el cas de l'exemple C_1 serà positiu i C_2 negatiu.

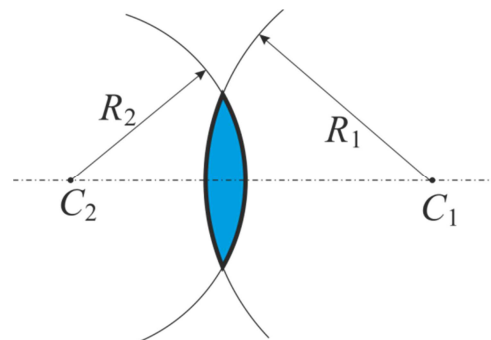


Figura 42: Esquema dibuixat per il·lustrar els radis de curvatura

Per trobar les distàncies focals d'objectius formats per més d'una lent s'usen les fórmules següents:

Si dues lents es troben en contacte: $F = \frac{1}{f} = \frac{1}{f_a} + \frac{1}{f_b}$

Si dues lents es troben separades una distància d : $F = \frac{1}{f} = \frac{1}{f_a} + \frac{1}{f_b} - \frac{d}{f_a f_b}$

On F és la distància focal efectiva del sistema, f_a és la distància focal efectiva de la primera lent, f_b és la distància focal efectiva de la segona lent i d és la distància que separa les dues lents. Anomenem distància focal efectiva a la distància focal per distingir-ho d'altres distàncies focals també utilitzades com ara: la distància focal davantera (distància des del punt focal del davant del sistema fins al vèrtex de la primera superfície òptica) i la distància focal posterior (la distància des del vèrtex de

l'última superfície òptica del sistema fins al focus del darrere). Aquestes dues distàncies focals només s'usen en el cas que s'estigui treballant amb lents gruixudes. Podem distingir dos tipus d'objectius segons la seva distància focal: els objectius de focal fixa i els objectius amb distància focal variable o zoom. Els objectius zoom³ tenen l'avantatge que no cal canviar l'objectiu si es vol fer una fotografia amb un menor angle de visió. Però utilitzar un objectiu de focal fixa també té avantatges com ara que són més petits, pesen menys i les imatges queden més nítides.

L'angle de visió és la quantitat de l'escena que la lent pot capturar mesurada en graus o mil·límetres. Això depèn de l'objectiu que s'estigui utilitzant. Per un mateix sensor una focal curta dóna lloc a un angle de visió gran pel contrari una focal llarga dóna lloc a un angle de visió petit.

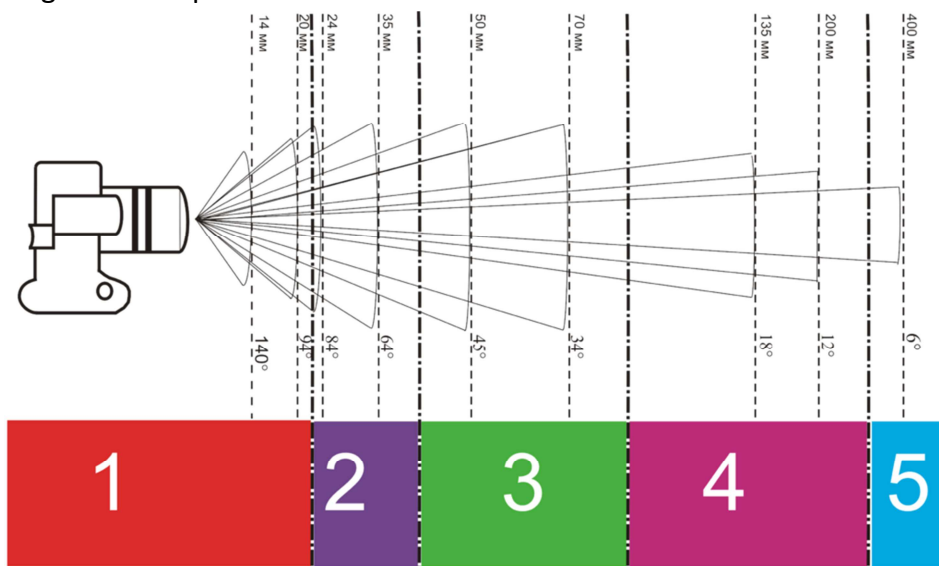


Figura 43: angles de visió de les càmeres. 1. Objectiu ull de peix. 2. Objectiu de gran angular. 3. Objectiu normal. 4. Teleobjectiu 5. Super teleobjectiu http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81ngulo_de_visi%C3%B3n#mediaviewer/

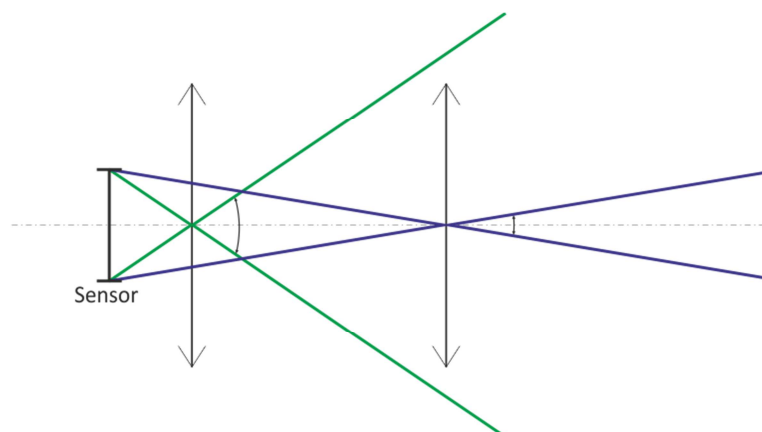


Figura 44: esquema dibuixat per explicar l'angle de visió

³ A la paraula zoom s'utilitza també en el cas del zoom digital per designar una ampliació digital a posteriori d'un fragment de la imatge que comporta una disminució de la resolució.

En l'esquema de la pàgina anterior surten representats els raigs que travessen dues lents en color blau i verd. Els raigs estan dibuixats seguint la propietat que els raigs que passen pel centre d'una lent prima no es desvien. Els verds representen els raigs que van des dels extrems del sensor i travessen la primera lent (que té una focal curta) pel centre i els blaus són els de la segona lent (que té una focal llarga). Com veiem a l'esquema la lent de focal curta (raigs verds) té un angle de visió major que el de la lent de focal llarga (raigs blaus). L'angle de visió és el mateix que l'angle donat pel triangle que es forma a partir del centre de la lent i els extrems del sensor.

S'anomena obertura efectiva al diàmetre del feix lluminós que travessa l'objectiu. Es representa amb el símbol \emptyset i s'expressa en mil·límetres. L'obertura relativa és la relació entre la distància focal i l'obertura efectiva i es coneix com a número f.

$$\text{Número } f = \frac{\text{distància focal}}{\emptyset}$$

Aquesta divisió dóna una seqüència de números que són: 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22...

4.2 Enfocament i profunditat de camp

L'enfocament: una càmera és un sistema que fa que punts de l'escena es projectin en punts del sensor i formar una imatge nítida. El cas ideal seria que els punts que provenen d'un mateix pla quedessin enfocats en el sensor. Una imatge d'aquestes característiques seguiria la fórmula de Gauss amb el criteri cartesià de signes:

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{x} = \frac{1}{x'}$$

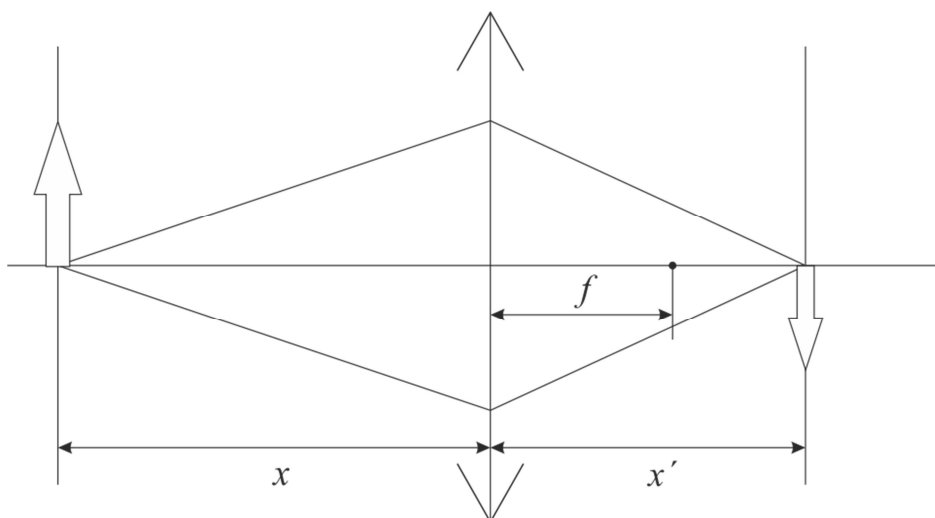


Figura 45: esquema de formació de la imatge per una lent convergent de focal f

Però a la pràctica les càmeres poden enfocar més d'un pla, ja que els píxels del sensor no són puntuals. Això vol dir que no només s'enfocarà el pla que volem sinó que també podrem veure plans per davant i per darrere d'aquest que també quedaran nítids.

Com més a prop de la càmera estigui l'objecte que volem fotografiar, menys tros de la imatge quedarà enfocat i com més lluny es trobi l'objecte més tros es veurà nítid. Aquest rang on veiem l'escena nítida l'anomenem profunditat de camp.

En aquest esquema es mostra com es forma una imatge on f és el focus de la lent i l'objecte que es vol fotografiar és la fletxa blanca. Per explicar l'enfocament i la profunditat de camp ampliarem la zona de l'esquema on es troba la lupa i estudiarem que succeeix en cada cas.

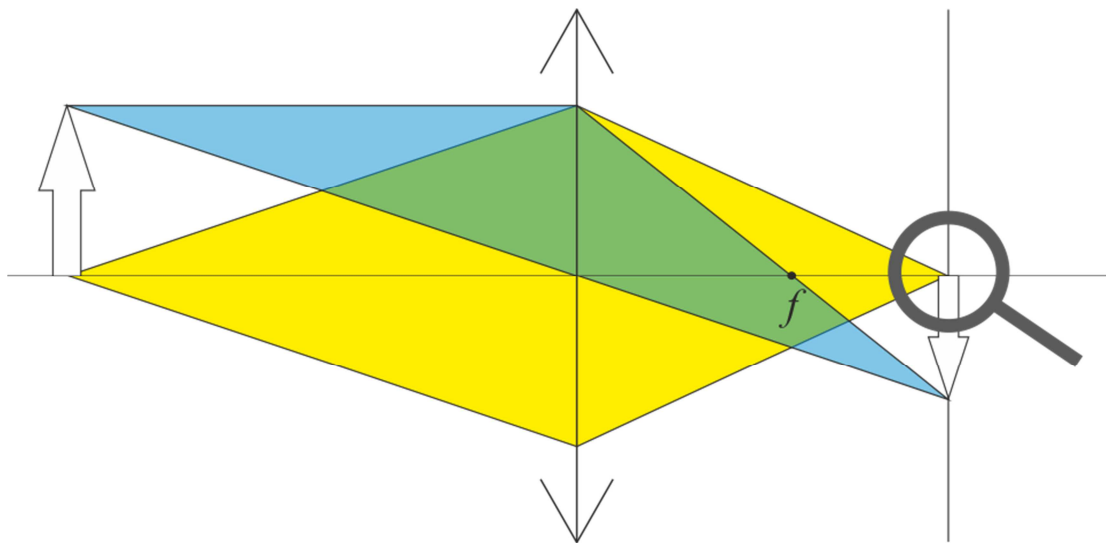


Figura 46: esquema de com es forma una imatge on els raigs que surten de l'objecte arriben a la imatge. Per estudiar la profunditat de camp ens fixarem en detall el que li passa al píxel situat a l'eix òptic.

En els esquemes següents es mostren els tres casos extrems de la profunditat de camp. Els raig de color groc representa el raig de llum que arriba al píxel⁴ representat pel rectangle rosa. Com a aproximació diem que tota la llum que arriba a un píxel, sense que ens importi com hi toca, contribueix a generar el senyal que donarà lloc a la imatge. No podem conèixer on ha caigut la llum dins el píxel.

⁴ Aquesta explicació també és vàlida per la profunditat de camp en el cas de la fotografia química i l'ull, però per explicar-ho els píxels són més visuals.

1r cas: en aquest primer esquema està representat el cas ideal. El punt que volíem fotografiar (punt d'enfocament) queda exactament a sobre del píxel i per tant es veurà nítid.

2n cas: el punt que volem fotografiar queda per darrere del píxel. El con de llum la base del qual es defineix pel píxel contribueix a generar la imatge.

3r cas: en aquest cas el punt que volem fotografiar queda per davant del píxel però per la mateixa raó que el segon cas el con de llum que travessa al punt d'enfocament i va a parar al píxel conté gairebé la mateixa llum que el cas anterior. Per tant, el senyal que obtindrem serà igual a l'anterior.

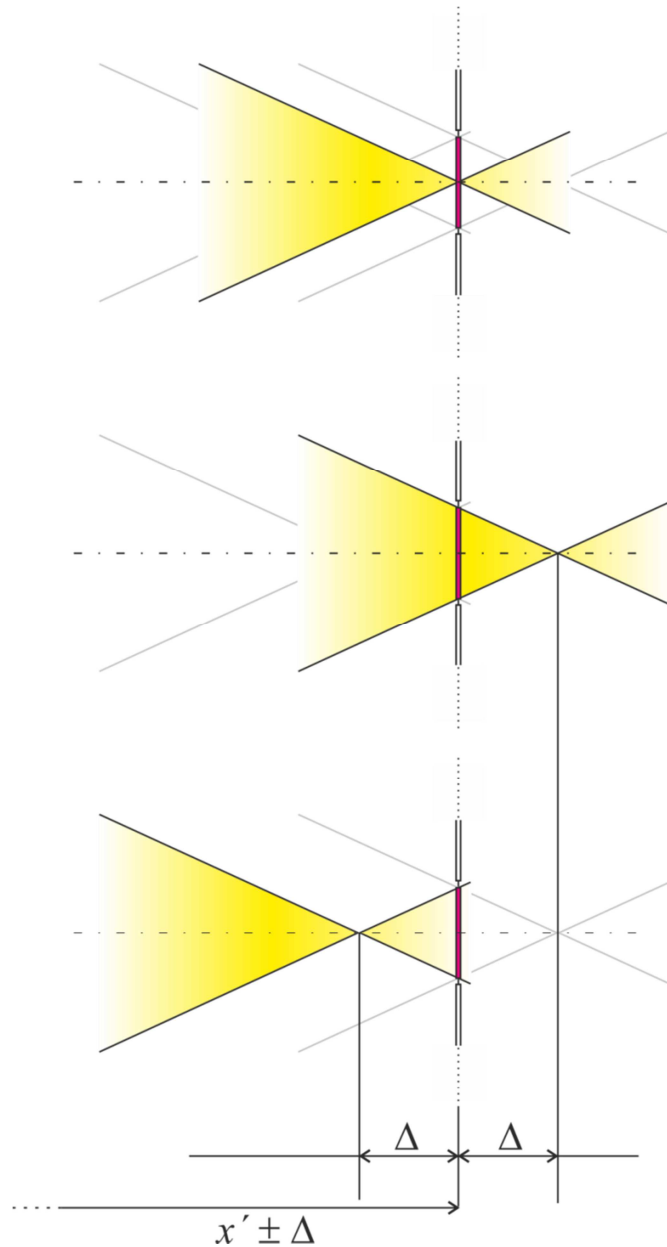


Figura 47: esquema per explicar la profunditat de camp

Donats els exemples i utilitzant com a referència la fórmula de Gauss, podem deduir la fórmula per determinar la profunditat de camp que és la següent: $\frac{1}{f} + \frac{1}{x} = \frac{1}{x' \pm \Delta}$

El punt enfocat més proper, X_n , l'obtenim quan fem: $\frac{1}{f} + \frac{1}{X_n} = \frac{1}{x' + \Delta}$

El punt enfocat més llunyà, X_f , l'obtenim quan fem: $\frac{1}{f} + \frac{1}{X_f} = \frac{1}{x' - \Delta}$

La diferència entre $|X_f| - |X_n|$ ens donarà la profunditat de camp.

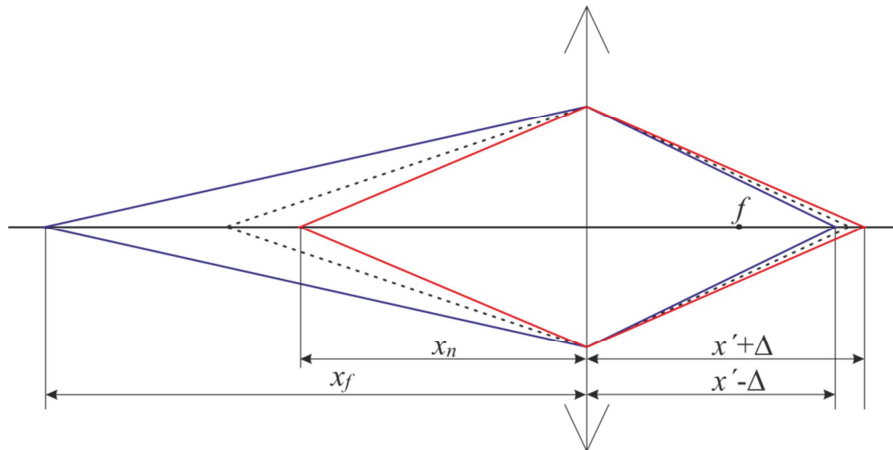


Figura 48: esquema per obtenir la profunditat de camp

- Experiment 4: estudi de la profunditat de camp

Amb el següent experiment hem volgut observar tres casos on podem apreciar la profunditat i estudiar què succeeix. S'han col·locat tres objectes en fila. El primer es troba a una distància de 30 cm de la càmera i la distància entre els tres objectes és de 140 cm. S'ha utilitzat una càmera rèflex digital amb un objectiu de 38 mm.

- Primera imatge

En la primera imatge s'ha enfocat el primer objecte.



Figura 49: primera imatge de la profunditat de camp

En aquest esquema podem veure que succeeix. L'ànec és l'objecte que hem volgut enfocar i queda completament enfocat. Com que estem fotografiant un objecte molt proper a la càmera la profunditat de camp en aquest cas és molt petita i per aquesta raó hi ha molt poc tros de la imatge enfocat.

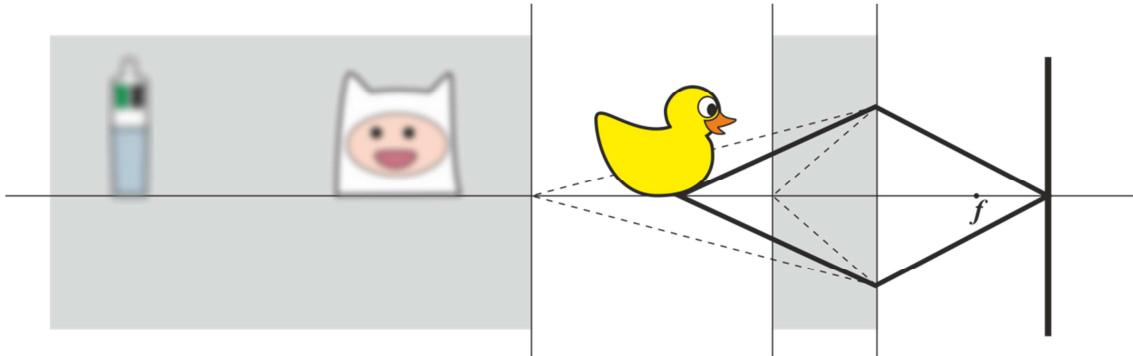


Figura 50: Esquema de la figura 49

- Segona imatge

En la segona imatge s'ha enfocat el segon objecte.



Figura 51: segona imatge de la profunditat de camp

L'esquema representa la segona fotografia. El segon objecte queda completament enfocat i podem veure com els altres no. En aquest segon cas la profunditat de camp comença a ser més notable, ja que el tercer objecte està gairebé enfocat.

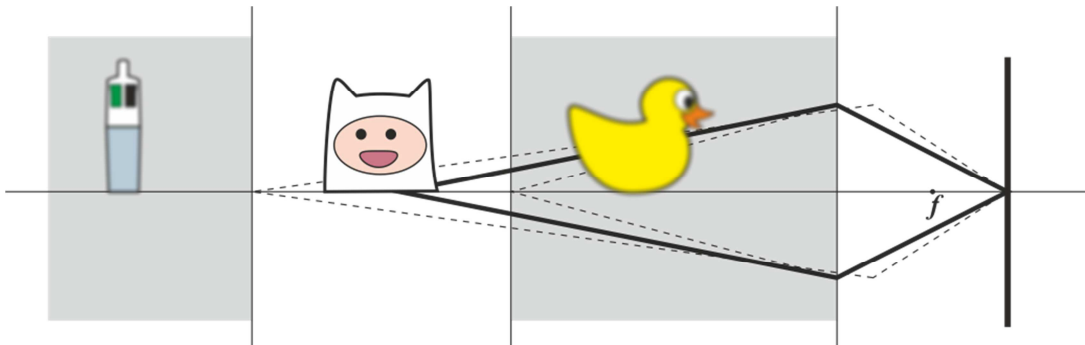


Figura 52: Esquema de la figura 41

- Tercera imatge

En la tercera imatge s'ha enfocat el tercer objecte.



Figura 53: Tercera imatge de la profunditat de camp

L'esquema representa la tercera fotografia. En aquesta fotografia es fa molt més notable la profunditat de camp que en l'anterior. En aquest cas no només està enfocada el tercer objecte sinó que podem veure que elements de la imatge que es troben per darrere d'aquest també es troben enfocats.

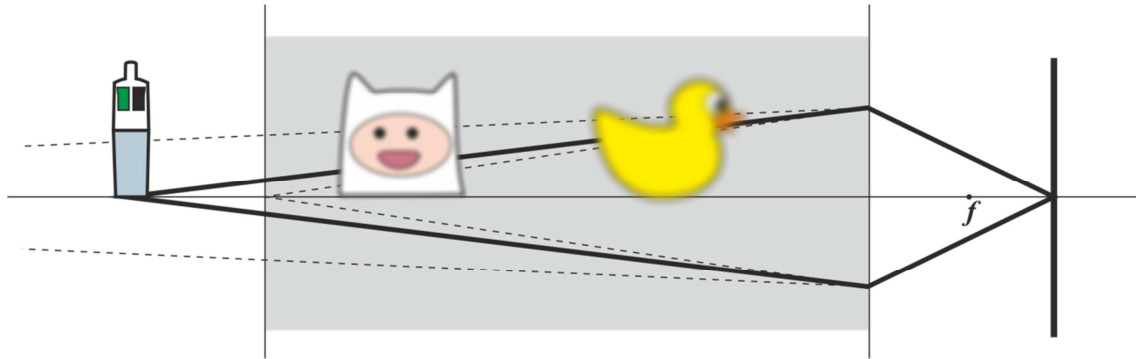


Figura 54: Esquema de la figura 43

5. Problemes introduïts per les lents

5.1 Aberracions monocromàtiques

La introducció de sistemes òtics als sistemes poden causar certs defectes anomenats aberracions. Moltes d'aquestes aberracions són conseqüència de les lleis de la refracció-reflexió de la llum. Les aberracions monocromàtiques són totes aquelles que no tenen a veure amb el color de la llum i a continuació s'expliquen les més freqüents.

5.1.1 Aberració esfèrica

És un tipus d'aberració que es produeix per la falta de convergència dels raigs de llum que passen per la perifèria de la lent. Aquests raigs són refractats amb un major grau que els que incideixen pel centre de la lent. Això dona lloc a la producció de diversos punts focals. Quan la lent és convergent els raigs marginals convergeixen a menor distància que els centrals i viceversa si la lent és divergent.

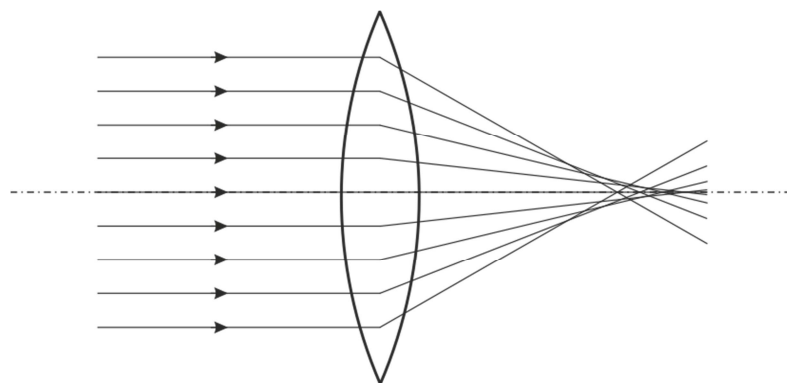


Figura 55: Esquema dibuixat per explicar l'aberració esfèrica

Com hem dit abans l'aberració esfèrica té lloc quan els raigs de la perifèria convergeixen en un altre punt. Una solució temporal a aquest problema seria tancar el diafragma per no deixar passar aquests raigs que ens distorsionen la imatge. Però aquesta és una solució poc pràctica. L'aberració esfèrica se soluciona amb la combinació de dos elements amb aberració esfèrica similar però oposada.

5.1.2 Distorsió

Si fotografiem unes línies rectes amb un objectiu que no té distorsió aquestes haurien de sortir a la imatge com a línies rectes. Però hi ha lents que no compleixen això i fan que les línies rectes es tornin corbes en la imatge. Podem distingir dos tipus de distorsió segons cap a on estan corbades les línies: si estan corbades cap en dins, distorsió de barril, o bé si ho estan cap en fora, distorsió de coixí.

La distorsió de barril s'acostuma a accentuar sobretot a quan utilitzem lents amb focals curtes com és el cas dels objectius amb grans angulars (ull de peix). En el cas d'utilitzar objectius amb focals llargues (teleobjectius) la distorsió de barril desapareix i acostuma a aparèixer la distorsió de coixí.

- Experiment 5: distorsió en una lent

S'ha dissenyat un experiment per poder observar la distorsió. Amb una lent de poca qualitat i focal 4 cm s'ha construït un objectiu utilitzant com a materials: cartolina negra, un tap de plàstic i cinta aïllant. Amb aquest objectiu, acoblat a una càmera rèflex digital, s'han fet fotografies a dues quadrícules, prèviament dibuixades, per poder veure si la nostra lent pateix aquesta aberració.

S'han projectat aquestes dues quadrícules a la pantalla de l'ordinador i s'han fet fotografies. Si la lent no tingués distorsió s'haurien d'obtenir imatges amb línies rectes.

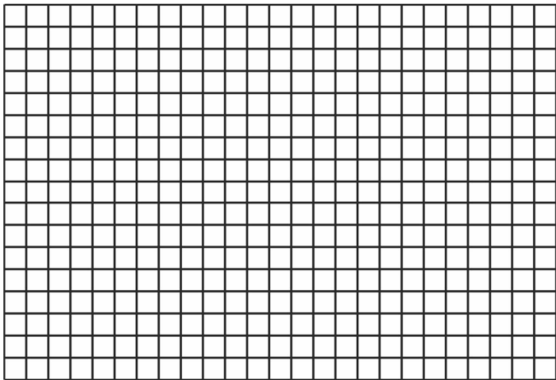


Figura 56: patró fet i utilitzat per estudiar la distorsió

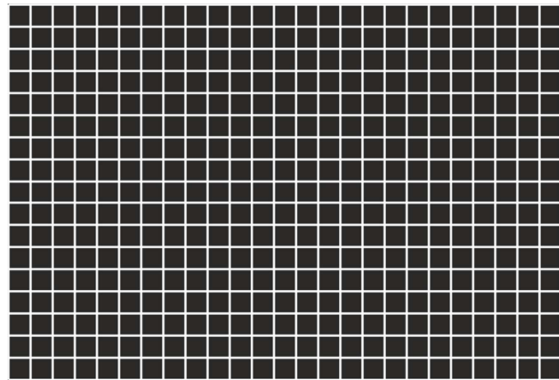


Figura 57: patró fet i utilitzat per estudiar la distorsió

Aquestes són les fotografies obtingudes:

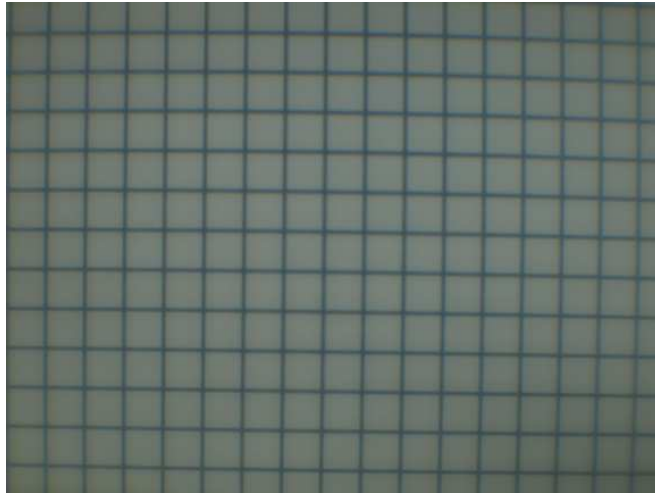


Figura 58: imatge obtinguda amb la lent de focal 4 cm a partir del patró de la figura 45

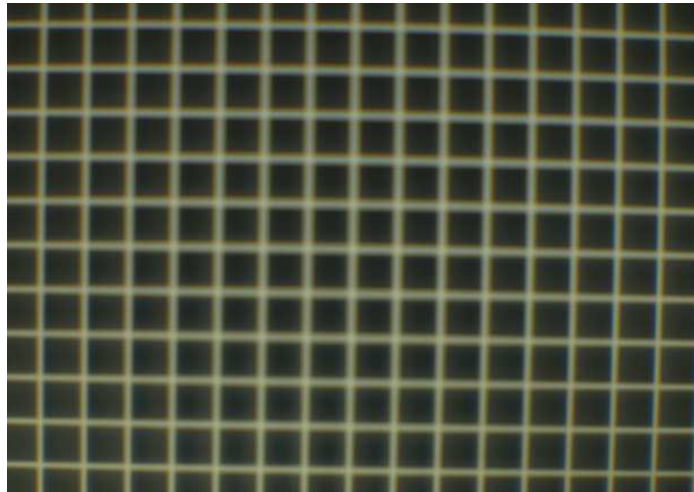


Figura 59: imatge obtinguda amb la lent de focal 4 cm a partir del patró de la figura 46

El que podem observar és que les línies de la quadrícula de la foto estan subtilment corbades. Podríem dir doncs que la lent utilitzada té una miqueta de distorsió.

5.1.3 Coma

El coma és una aberració que es deu a alguns defectes de disseny, imperfeccions a les lents o altres components. El coma s'aprecia pels raigs que no es troben a prop de l'eix òptic, és a dir els perifèrics. Una imatge amb coma es reconeix perquè les fonts puntuals fora d'eix, com ara estrelles, poden aparèixer amb unes distorsions en forma de cua.

El coma es considera una de les aberracions que causa més problemes, ja que el seu efecte és asimètric. El nom d'aquesta aberració ve donat perquè les formes que apreciem a la imatge recorden a un cometa.

- Experiment 6: observació del coma

S'ha dissenyat un experiment per poder observar el coma. Amb l'objectiu d'una lent de focal 4 cm (utilitzat en l'experiment 5) hem fet fotografies a dos patrons prèviament dibuixats. Com que el coma es manifesta quan es fan fotografies a fonts puntuals el patró és un seguit de punts que formen una quadrícula. Degut que el coma és una aberració causada pel disseny de l'objectiu per poder veure'l hem hagut de torçar una miqueta la lent.

Per poder observar el coma hem hagut de posar la lent en una posició inclinada. D'aquesta manera variem els angles d'incidència dels diferents raigs que incideixen.

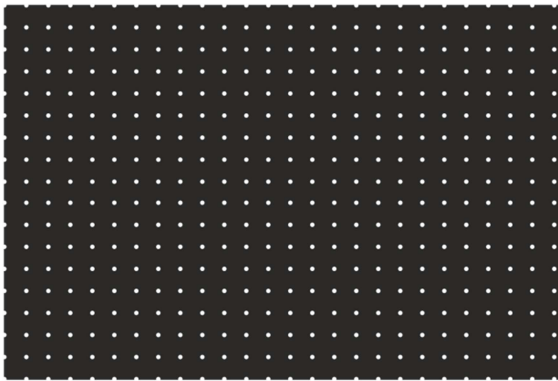


Figura 60: patró fet i utilitzat per estudiar el coma

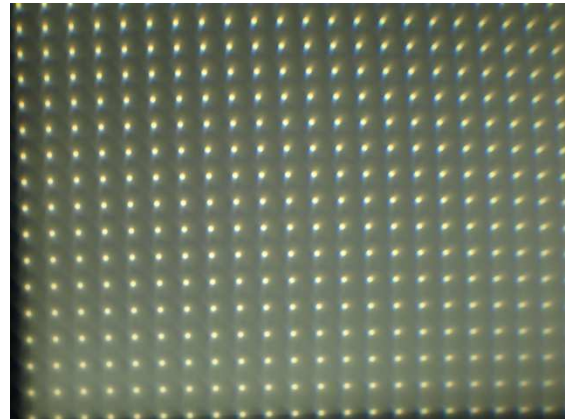


Figura 61: imatge obtinguda amb la lent de focal de 4 cm a partir del patró de la figura 49

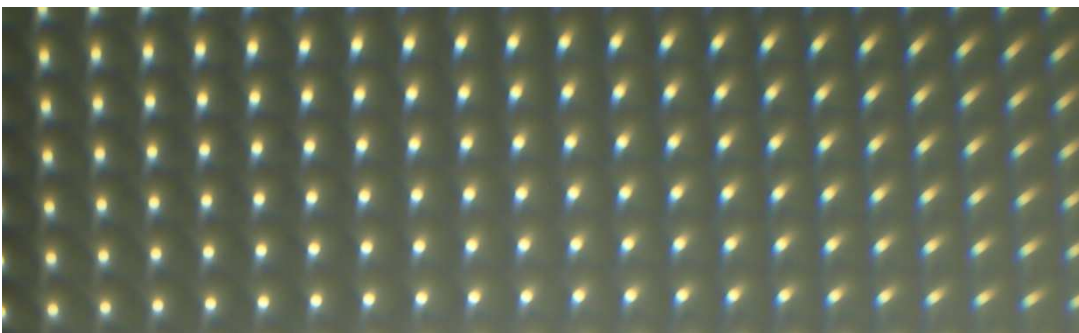


Figura 62: Detall de la figura 50

A la dreta de la imatge ampliada apreciem com la imatge d'un punt es transforma en una taca en forma de cometa o gota d'aigua.

5.1.4 Astigmatisme

L'astigmatisme és una aberració que es dona quan els raigs horitzontals i verticals, que provenen d'un objecte i travessen la lent, convergeixen a distàncies diferents. Aquest fet es pot donar per dos motius:

- Quan l'objecte que volem fotografiar es troba molt lluny de l'objectiu els raigs horitzontals i verticals tenen diferents focus, el que fa que la imatge es vegi distorsionada.
- L'altre tipus d'astigmatisme es pot donar a causa d'una mala alineació de les lents que formen el sistema. És a dir que no totes les lents estan alineades amb l'eix òptic.

5.2 Aberració cromàtica

L'aberració cromàtica és un tipus de distorsió que es deu a que les lents són incapaces d'enfocar tots els colors en un mateix punt. El focus d'una lent ve donat per la geometria de les superfícies i l'índex de refracció que varia segons el color de la llum. Això fa que la imatge no es pugui formar en un únic punt sinó que es formen diverses imatges, una per cada color, cadascuna amb la seva distància focal i per tant amb diferent grau de nitidesa.

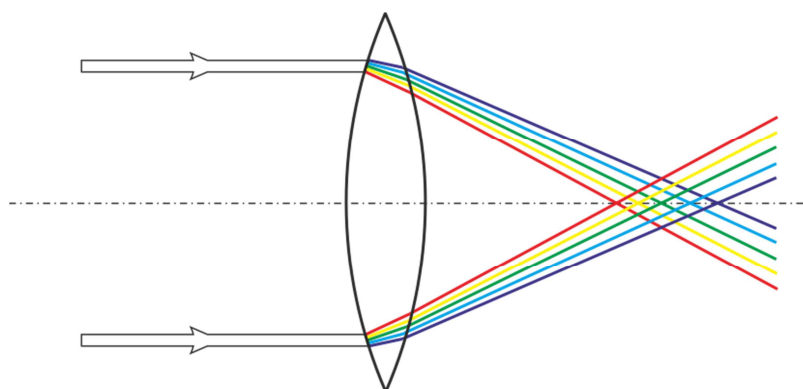


Figura 63: esquema fet per explicar l'aberració cromàtica

Newton va proposar una solució molt senzilla per corregir l'aberració cromàtica que consisteix a posar dos prismes, l'un al costat de l'altre, però invertits. D'aquesta manera la descomposició de la llum que realitza el primer es veu compensada per l'altre.

El sistema òptic més senzill per corregir l'aberració cromàtica el va proposar Charles Chevalier, consisteix en un sistema format per dues lents i se'l coneix com a doblet acromàtic. les dues lents que el formen són una lent convergent biconvexa (vidre

crown) i enganxada a una altra lent cònca-convexa (vidre flint). Els dos vidres, crown i flint, fan la dispersió de la llum en els seus colors de forma oposada i es compensen. Els sistemes òptics que corregeixen aquesta aberració es diuen acromàtics.

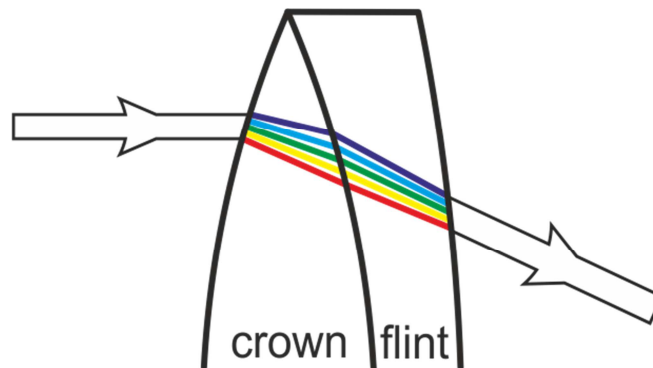


Figura 64: esquema fet per explicar el funcionament dels doblats cromàtics

- Experiment 7: aberració cromàtica en una lent

S'ha dissenyat un experiment per poder observar l'aberració cromàtica. Amb l'objectiu, ja utilitzat en els experiments 5 i 6, format per una única lent de focal 4 cm s'han fet fotografies d'un esglaó blanc i negre. Com que la lent no és de gaire qualitat el que esperem observar és un arc de Sant Martí al límit entre les dues franges. S'ha projectat a la pantalla de l'ordinador la següent imatge.

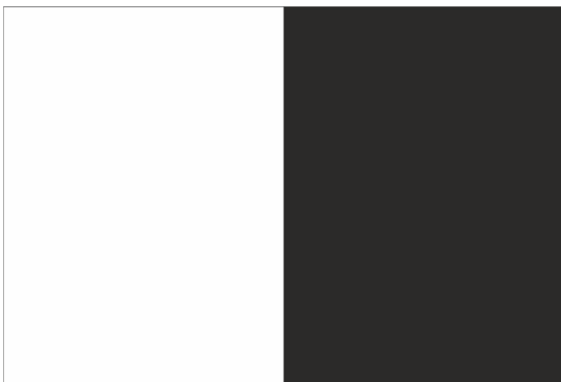


Figura 65: patró utilitzat per estudiar l'aberració cromàtica

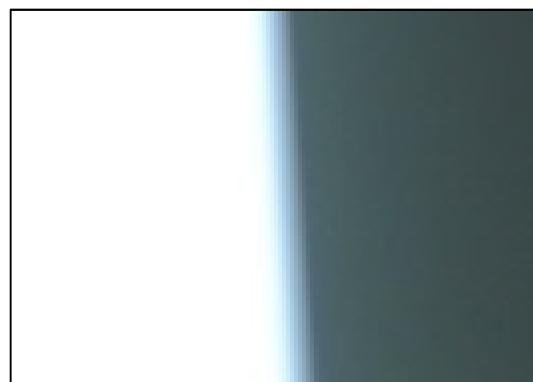


Figura 66: detall de la imatge obtinguda amb la lent de focal 4 cm a partir del patró de la figura 54.

A la dreta tenim un detall ampliat de la imatge de la zona de transició del blanc al negre. Podem observar una miqueta d'aberració cromàtica però l'únic color que apareix i que no hi hauria de ser és el blau.

Ampliarem una altra imatge obtinguda en l'experiment del coma on s'aprecia molt millor aquesta aberració. Veiem que els colors van del blau fins al vermell mentre que el que hi havia a la realitat era un punt blanc.

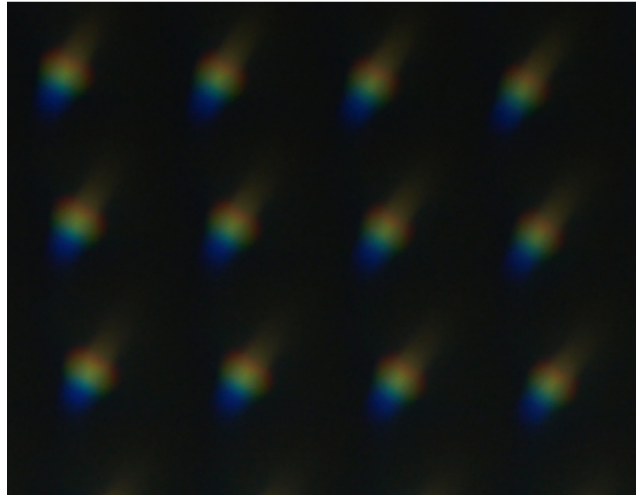


Figura 67: imatge obtinguda amb la lent de focal 4 cm a partir del patró de la figura 49 podem observar més clarament l'aberració cromàtica

6. Conclusions

Després de realitzar la memòria del treball, puc dir que he assolit els meus objectius esmentats a la introducció el principal dels quals era poder explicar els conceptes de la manera més entenedora possible. Per fer-ho he dissenyat una sèrie d'experiments i esquemes que complementen les explicacions.

En l'experiment 2 he pogut complir el meu primer objectiu que era construir una càmera amb la qual poder fer fotos. Tot i que no he pogut renunciar a processos i tecnologies actuals, com el rodet i el revelat, he sigut capaç de construir una càmera amb una caixa de llumins i poc més. No només he pogut construir-la sinó que també he pogut calibrar els temps d'exposició segons la quantitat de llum. En un estadi inicial tenia previst trobar-me amb dificultats a l'hora de realitzar aquest experiment. Totalment en contra de les lleis de Murphy en el primer intent vaig obtenir resultats tan satisfactoris que van trencar amb les poques expectatives que tenia. Encoratjada per aquest èxit vaig decidir que calia trobar un repte que completés la recerca i vaig optar per estudiar el que succeeix quan afegim una lent simple al sistema.

Amb els experiments 5, 6 i 7 he pogut assolir l'objectiu de mostrar experimentalment els problemes que poden presentar quan afegim una lent simple a la càmera. En aquesta part del treball vaig decidir no conformar-me només a trobar una imatge d'internet que ho pogués il·lustrar sinó que vaig voler fer les meves pròpies fotos.

A l'hora de respondre el meu principal objectiu a l'apartat 4, trobar una manera visual d'explicar la teoria, va ser una miqueta més difícil. En aquesta part, com que els experiments que es podrien haver realitzat són difícils o requereixen materials que no tenia, vaig decidir substituir la part experimental per un seguit d'esquemes dibuixats amb un programa d'ordinador. He après a utilitzar aquest programa i a enfrontar-me al repte d'explicar una part de la teoria amb dibuixos propis.

Després de realitzar aquest treball he pogut apropar-me més al mètode científic tot dissenyant els experiments dels quals he gaudit molt.

7. Bibliografia

Pfeiffer, N. i Travesset, A.: Física 1 batxillerat. Segona edició. Barcelona Ed. Casals, abril de 2011

Sidney, F. Ray: Photographic Optics. Second Edition. Oxford Ed. Focal Press, 1994

Tipler, Paul A.: Física. Tomo 2. Segunda edición. Rochester, Michigan Ed. Reverté

Fotonostra: diversos apartats. <http://www.fotonostra.com/glosario/> 2002

Fotoactualidad : « La primera cámara digital fue kodak y almadenaba en casetes »
<http://www.fotoactualidad.com/2010/08/la-primera-camara-digital-fue-kodak-y.html>
Any de publicació: 26 agost, 2010 Consulta: juliol, 2014

Lahman, Sean: “digital camera pioneers”
<http://www.seanlahman.com/2012/02/digital-camera-pioneers/> Any de publicació: 13 febrer, 2012 Consulta: juliol, 2014

Wikipedia: “Photographie argentique”
http://fr.wikipedia.org/wiki/Photographie_argentique Any de publicació: 6 desembre, 2014 Consulta: novembre, 2014

Institut Lopez de Mendoza: “Componentes de una cámara fotográfica y su funcionamiento”
http://www.lopezdemendoza.es/desc/imasonido/ap_fotocientifica_cap2.pdf
Consulta: juliol, 2014

Wikipedia: “Shutter speed” http://en.wikipedia.org/wiki/Shutter_speed any de publicació: 21 octubre, 2014 Consulta: setembre, 2014

Conrad, Jeff: “Depth of Field in Depth”
<http://www.largeformatphotography.info/articles/DoFinDepth.pdf> Any de publicació: 2014 Consulta: setembre 2014

Wikipedia: “sensor de imagen” http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_de_imagen Any de publicació: 25 març, 2014 Consulta: juliol, 2014

Larry Bullis, Tom Lindsay, Guillermo Peñate, Howard Wells, George L Smyth, Brigitte Harper, Gordon J. Holtslander: “FAQ Estenopeco” <http://pinholeday.org/> Any de publicació: 2 novembre, 2014 Consulta: juliol, 2014

Navarro, Alberto: “Cómo hacer una cámara estenopeica?”

<http://naturpixel.com/2010/06/14/como-hacer-una-camara-estenopeica/> Any de publicació: 14 juny, 2010 Consulta: juliol, 2014

Wikipedia: “Diaphragm (optics)”

http://en.wikipedia.org/wiki/Diaphragm_%28optics%29 Any de publicació: 14 maig, 2014 Consulta: juliol, 2014

Altato Ron: “Tres aberraciones de la física”

<http://elneutrino.blogspot.com.es/2012/06/las-tres-aberraciones-de-la-fisica.html> Any de publicació: 6 juny, 2012 Consulta: setembre, 2014

Teleformación: “Aberraciones”

<http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/aberracions/aberracions.htm#aEsferica> Consulta: juliol, 2014

Wikipedia: “fotografía en color” http://ca.wikipedia.org/wiki/Fotografia_en_color Any

de publicació: 28 juliol, 2014 Consulta: juliol, 2014

Informacion center: “Aberración esferica”

http://www.tecnicaenlaboratorios.com/Nikon/Info_aberracion_esferica.htm Consulta: agost, 2014

Wikipedia: “Astigmatism” <http://en.wikipedia.org/wiki/Astigmatism> Any de publicació:

13 Octubre, 2014 Consulta: novembre, 2014

Douglas A. Kerr, P.E.: “Astigmatism in camera lenses – Meridional and Sagittal MTF

Response” <http://dougkerr.net/Pumpkin/articles/Astigmatism.pdf> Any de publicació:

20 juny, 2014 Consulta: novembre, 2014

Cefire: “apertura efectiva y apertura relativa”

http://cefire.edu.gva.es/pluginfile.php/194548/mod_resource/content/0/contenidos/002/abertura_efectiva_y_abertura_relativa.html Consulta: setembre, 2014

Wikipedia: “Camara fotogràfica”

http://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_fotogr%C3%A1fica Any de publicació: 7 desembre, 2014 Consulta: juliol, 2014

Revista Quo: “la primera fotografia de la historia”

<http://www.cnnexpansion.com/especiales/2014/05/01/la-primera-fotografia-de-la-historia> Any de publicació: 3 maig, 2014 Consulta: juliol, 2014