

LA FUNCIÓ DE TRANSMISSIÓ ÒPTICA POLICROMÀTICA
I LA SEVA APLICACIÓ EN L'AVALUACIÓ DE LA
QUALITAT D'IMATGE D'UN INSTRUMENT FOTOGRÀFIC.

S. Bosch i Puig
Departament d'Òptica. Facultat de Física.
Universitat de Barcelona

RESUM

En aquest treball s'estudia la utilitat pràctica d'una sèrie de criteris de qualitat d'imatge basats en el mòdul de la funció de transferència policromàtica (MFTP) del sistema opto-fotogràfic que la forma . Alguns criteris es basen en l'àrea determinada per la corba del MFTP (calculada per a objectes que solament varien en una direcció : test de barres , test sinusoidal , esclatxa) i els eixos de coordenades . També es consideren criteris basats en l'autèntica funció MFTP bidimensional (transformada de Fourier de la funció d'extensió del punt) aquests resulten especialment indicats per a l'avaluació de la qualitat d'imatge en zones de camp de l'instrument .

ABSTRACT

The validity of a series of criteria for evaluating image quality based on the modulus of the polychromatic optical transfer function (PMTF) of the image-forming instrument is studied. The criteria are based on the area determined by the coordinate axes on the curve of the one-dimensional PMTF (calculated for objects varying only in one direction : bar test , sinusoidal test , slit) . Quality criteria based on the two-dimensional character of the actual PMTF function (the Fourier transform of the point-spread function) are also proposed ; these are specially suitable for image evaluation in off-axis zones of the instrument.

1.- INTRODUCCIÓ

Un dels primers objectius de l'òptica, tal com concebem actualment aquesta ciència, fou l'obtenció d'imatges, concretament per a l'observació visual. Un cop superada la fase més primitiva en el disseny i la construcció d'instruments òptics fou necessari poder avaluar objectivament la "qualitat" de l'instrument. És clar, però, que no es pot abordar la definició de qualitat d'una manera general i per a qualsevol instrument òptic, sinó que això s'ha de fer en funció de la utilització pràctica usual de l'instrument.

Això donà lloc a multitud de criteris d'avaluació, cadascun del quals proposat per a un cas específic. Per exemple, resulta molt intuïtiu valorar la qualitat d'un microscopi pel seu poder separador, definit com la distància mínima en què dues línies es veuen encara separades. Però si pensem bé el problema és clar que planteja multitud d'imprecisions, ja només en la definició del criteri: com han d'ésser les línies que s'observin? com ha d'ésser el fons sobre el qual s'observen? què vol dir que es vegin separades?

És clar, doncs, que el problema de la definició de la qualitat d'un instrument òptic no és una qüestió trivial, ni tan sols si ens restringim a un camp d'aplicació determinat.

Quines haurien d'ésser les característiques d'un bon criteri de qualitat? És evident que serien desitjables les següents:

- Bona correlació amb la qualitat expressada per observadors.
- Avaluació quantitativa de la qualitat mitjançant un únic paràmetre si és possible.
- Resultats independents del tipus d'objecte.
- Possibilitat de relacionar-lo amb els paràmetres de construcció de l'instrument.
- Clara significació física.

-Possibilitat de mesura fàcil i fiable.

Naturalment, no disposant de tal criteri d'avaluació, les necessitats pràctiques imposaren els criteris de qualitat casuístics com a mitjà únic possible, malgrat totes les imprecisions en la definició i amb totes les limitacions que en comportava la utilització. Així, per exemple, pels astrònoms constituïa un bon criteri de prova de llurs telescopis l'observació i l'anàlisi de la imatge d'un estel, pels microscopistes la prova es realitzava per observació d'algunes mostres concretes seleccionades pel fet de contenir molts detalls petits, etc.

En el cas concret de mesurar el poder separador d'un instrument amb un test de barres, hom suggerí (Frieser, 1938) no emprar un objecte que tingués una variació espacial de perfil d'ona quadrada (test de barres), sinó un objecte de variació sinusoïdal, ja que aquest mantenia el perfil en la imatge, en canvi el perfil de la imatge de les barres variava molt quan s'operava prop dels límits de resolució de l'instrument.

Aquest fet pot considerar-se l'inici de l'aplicació en l'òptica dels mètodes d'anàlisi de sistemes, per bé que la idea no fou suggerida clarament fins que Duffieux introdueix en els sistemes òptics els conceptes de l'anàlisi de Fourier, que fins llavors s'havien aplicat bàsicament en acústica. Fonamentalment s'introdueix la idea que el sistema òptic convencional actua com un filtre lineal passa-baixos respecte als components espacials de l'objecte. Com a conseqüència, hom pot caracteritzar aquest sistema per una funció de transferència que anomenarem funció de transmissió òptica (FTO), que és representativa de com actua el sistema òptic sobre cada freqüència espacial en què es pot descompondre l'objecte amb què es treballi (Duffieux, 1946). La FTO és una funció complexa i, en molts casos, sols es treballarà amb el seu mòdul, que es designa abreujadament MFT.

Durant la dècada dels seixanta es desenvoluparen aparells destinats a la mesura de la FTO d'instruments. Simultàniament, fou sobretot Hopkins qui va establir les bases teòriques per a l'aplicació pràctica de la idea de la funció de transmissió òptica (Hopkins, 1962).

De totes maneres no resultava pas fàcil obtenir la instrumentació adequada per a la mesura de la funció de transmissió. Les comparacions de resultats entre diferents laboratoris no donaven un grau de coincidència gens satisfactori.

A la reunió de la "International Society for Photogrammetry" celebrada a Londres el 1966, hom proposà d'elaborar un conjunt de lents patró que poguessin servir de test de prova per als equips dels diferents laboratoris. Per a coordinar i impulsar aquesta col.laboració internacional, l'institut SIRA inicià el 1967 el projecte "Assessment and Specification of image quality" alhora que elaborava un conjunt de lents patró utilitzables per a la comparació de mesures entre laboratoris (Baker, 1970).

Actualment, la utilització del concepte de FTO per a l'especificació de característiques de lents o de sistemes òptics en general està totalment generalitzada i és reconegut que constitueix un mètode superior a qualsevol criteri de qualitat o resolució clàssic.

Un dels motius d'aquesta utilitat de la FTO és la possibilitat de multiplicar les FTO dels subsistemes que formen un sistema per a obtenir la FTO d'aquest. Per tal que això sigui vàlid, però, cal que es compleixi el següent: cada subsistema amb una FTO definida no ha de produir una imatge parcialment coherent per al següent subsistema, i/o aquest subsistema no ha d'ésser sensible a aquesta coherència. Això és així perquè el concepte de funció de transmissió òptica només és aplicable a sistemes treballant amb il.luminació incoherent.

és important de fer notar per al cas que ens interessarà que aquesta condició es compleix quan es tracta d'analitzar un sistema òptic que forma una imatge que es registra fotogràficament i després s'observa aquesta imatge en unes condicions determinades.

Respecte als mètodes de mesura, centrant-nos principalment en el MFT, cal fer notar que les mesures experimentals inclouen efectes de llum difosa i reflexions múltiples que, en general, no es tenen en compte en els càlculs teòrics. Aquesta és una font de divergències que resulten de poca importància en sistemes d'alta qualitat, però que poden ésser importants en sistemes amb lents no polides o brutes. Quant a la fase de la FTO, la seva mesura és més difícil i les divergències en els resultats són grans.

Per a lents esfèriques i en la zona de l'eix òptic, el MFT és una funció idèntica per a totes les direccions. Fora d'eix, el MFT varia segons l'orientació considerada. Per a una direcció concreta, el MFT és el mòdul de la transformada de Fourier unidimensional de la "funció d'extensió de la línia" (imatge d'una línia infinitament estreta). Es poden tenir en compte totes les orientacions simultàniament definint la FTO com la transformada de Fourier de la "funció d'extensió del punt" (imatge bidimensional d'un punt objecte ideal). Llavors el MFT seria representat per una superfície en un espai tridimensional on les variables independents són les freqüències espacials.

Una definició equivalent del MFT és que correspon al mòdul de la funció d'autocorrelació normalitzada de la funció pupil·la complexa del sistema òptic. Aquesta funció combina informació sobre la funció d'aberració d'ona a la pupil·la de sortida de l'instrument i sobre la distribució d'intensitat en aquesta.

2.-PROPÒSIT

Com ja s'ha dit a la introducció, la idea bàsica en l'ús de la FTO per a caracteritzar un sistema òptic és la possibilitat de tractar-lo com un sistema lineal qualsevol. Amb tot, cal precisar les condicions en què es fa això.

En primer lloc, treballant amb il·luminació monocromàtica incoherent, la funció complexa FTO s'acostuma a substituir únicament pel seu mòdul MFT, tant per la seva adequada significació teòrica com per la major facilitat de mesura experimental.

D'altra part, les condicions d'interès pràctic més corrents corresponen a il·luminació policromàtica incoherent, cosa que porta a la introducció de la funció de transmissió òptica policromàtica (FTOP) i del seu mòdul (MFTP), la qual cosa s'ha de fer amb certes limitacions.

El que hom pretén en el present treball és estudiar les condicions d'aplicació del MFTP per a l'avaluació conjunta d'un sistema opto-fotogràfic, és a dir, un sistema òptic que forma una imatge que és recollida per una placa fotogràfica.

Per tant, primerament hom tractarà la teoria i les condicions de mesura d'aquest MFTP i, en un segon pas, hom definirà i analitzarà diversos criteris de qualitat basats en el MFTP, dels quals caldrà estudiar l'adequació per comparació amb valoracions realitzades per diversos observadors.

3.-FUNCIO DE TRANSMISSIO ÒPTICA.

és sabut que un sistema òptic treballant amb un objecte il·luminat amb llum quasi-monocromàtica incoherent és un sistema lineal respecte a les intensitats de llum (Françon, 1972). És a dir, si suposem que l'objecte és una certa distribució d'intensi-

tats $o(x,y)$, el sistema òptic en formarà una imatge definida per la seva distribució d'intensitats $i(x',y')$, de manera que realitza una transformació lineal respecte a aquestes magnituds.

D'altra part, un sistema òptic no és espacialment invariant (isoplanàtic). Perquè fos així caldria que la imatge d'un punt objecte només canviés de lloc, i no de forma, en canviar la posició del citat punt objecte dins el camp de treball de l'instrument. Amb tot, si hom divideix el camp objecte en zones petites, a cada una d'elles es pot considerar aproximadament que el sistema es comporta com a isoplanàtic, i així, complint-se aquesta condició juntament amb la de linealitat, es podrà definir una funció de transmissió per a aquella zona del camp, o, cosa equivalent, existirà una funció de resposta impulsional característica de la zona considerada que es designarà $h(x,y)$.

D'aquesta manera

$$i(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} o(\mu,\beta) h(x-\mu,y-\beta) d\mu d\beta$$

o sigui, la imatge és la convolució bidimensional de la funció objecte i la resposta impulsional bidimensional del sistema òptic en la zona isoplanàtica en estudi.

Designant amb les lletres majúscules corresponents les transformades de Fourier de les funcions $o(x,y)$ i $i(x,y)$, resulta (Goodman, 1972):

$$I(u,v) = H'(u,v) O(u,v)$$

on

$$H'(u,v) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(\mu,\beta) \exp(-i2\pi(u\mu+v\beta)) d\mu d\beta$$

és la transformada de Fourier de la resposta impulsional.

La funció $H'(u,v)$, normalitzada de manera que $H'(0,0)=1$, és el que hom anomena funció de transmissió òptica del sistema en les condicions de treball (FTO) i es designarà $H(u,v)$, o sigui

$$H(u,v) = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} h(\mu,\beta) \exp(-i2\pi(u\mu+v\beta)) d\mu d\beta}{\iint_{-\infty}^{\infty} h(\mu,\beta) d\mu d\beta}$$

El mòdul d'aquesta funció complexa es denomina mòdul de la funció de transmissió òptica (MFT). Tot això, cal recordar-ho, en il·luminació quasi-monocromàtica incoherent.

Realment, $H(u,v)$ és una funció bidimensional que no s'acostuma a calcular com a tal. Altrament, se sol mesurar la funció de transmissió unidimensional per a dues direccions privilegiades.

En el cas particular de treballar amb l'objecte a l'eix, la funció $H(u,v)$ tindrà simetria radial, de manera que quedarà perfectament caracteritzada sabent, per exemple, la $H(u,0)$ que correspon a la funció de transmissió unidimensional definida per a objectes que només tinguin variació respecte a la coordenada x .

Si la zona de treball isoplanàtica considerada és extra-axial, hi ha dues direccions privilegiades per a les quals es mesura la funció H unidimensional: la direcció tangencial i la direcció sagital.

D'aquesta manera, a la pràctica, no es treballa amb la resposta impulsional bidimensional (funció d'extensió del punt) sinó que es considera la resposta del sistema a una línia objecte, és a dir, la funció d'extensió de la línia.

4.-FUNCIO DE TRANSMISSIO POLICROMATICA

4.1.-Definició

Per a poder definir una funció de transmissió policromàtica, és a dir, una funció de transmissió per a un sistema òptic operant amb un objecte il·luminat amb llum incoherent de certa composició espectral, cal imposar, a més de les condicions de linealitat i isoplanatisme, altres condicions al sistema (Barnden, 1974).

Bàsicament cal exigir que la intensitat d'emissió de l'objecte per a cada longitud d'ona i per a cada posició, $o(x)$, es pugui factoritzar de la manera següent:

$$o_{\lambda}(x) = E(\lambda) o(x)$$

on $E(\lambda)$ és la composició de la llum que arriba a l'objecte.

D'aquesta manera, la intensitat total emesa per un punt x de l'objecte serà

$$o_p(x) = \int_{\lambda} o_{\lambda}(x) d\lambda = o(x) \int_{\lambda} E(\lambda) d\lambda$$

essent $o(x)$ la transmitància o reflectància del punt, que sols ha d'ésser funció del propi punt. Certament, aquestes restriccions són fortes, però resulten imprescindibles per al desenvolupament posterior.

Si la funció d'extensió de la línia del sistema, per a una determinada longitud d'ona λ és $d_{\lambda}(x)$ i la sensibilitat espectral del receptor per a aquest color és $R(\lambda)$, la intensitat de la imatge per a aquesta il·luminació policromàtica serà

$$i_p(x) = \int_{\lambda} R(\lambda) d\lambda \int_{-\infty}^{\infty} E(\lambda) o(\mu) d_{\lambda}(x-\mu) d\mu$$

on

$$i_{\lambda}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} E(\lambda) o(\mu) d_{\lambda}(x-\mu) d\mu$$

és la intensitat que forma la imatge per a la posició x i per a la longitud d'ona λ .

D'altra part, la funció de transmissió per a cada és

$$H_{\lambda}(u) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d_{\lambda}(\mu) \exp(-i2\pi u\mu) d\mu}{\int_{-\infty}^{\infty} d_{\lambda}(\mu) d\mu} = \frac{D_{\lambda}(u)}{D_{\lambda}(0)}$$

Considerem les transformades de Fourier de l'objecte i de la imatge

$$O_p(u) = \int_{\lambda} E(\lambda) d\lambda \int_{-\infty}^{\infty} o(x) \exp(-i2\pi xu) dx$$

$$\begin{aligned} I_p(u) &= \int_{\lambda} R(\lambda) E(\lambda) d\lambda \int_{-\infty}^{\infty} (o(x) \otimes d(x)) \exp(-i2\pi xu) dx = \\ &= \int_{\lambda} R(\lambda) E(\lambda) d\lambda \left(\int_{-\infty}^{\infty} o(\mu) \exp(-i2\pi u\mu) d\mu \right) \left(\int_{-\infty}^{\infty} d_{\lambda}(\beta) \exp(-i2\pi u\beta) d\beta \right) \end{aligned}$$

Si formem el quocient de transformades, en un intent de definir la funció de transmissió, resultarà

$$\frac{I_p(u)}{O_p(u)} = \frac{\int_{\lambda} R(\lambda) E(\lambda) d\lambda \left(\int_{-\infty}^{\infty} d_{\lambda}(\mu) d\mu \right) H_{\lambda}(u)}{\int_{\lambda} E(\lambda) d\lambda}$$

Si hom vol que la funció de transmissió policromàtica, com la monocromàtica, valgui la unitat per a les freqüències nul·les, només cal normalitzar convenientment, de manera que es defineix la funció de transmissió òptica policromàtica (FTOP) segons la següent expressió:

$$H_p(u) = \frac{\int_{\lambda} R(\lambda) E(\lambda) D_{\lambda}(0) H_{\lambda}(u) d\lambda}{\int_{\lambda} R(\lambda) E(\lambda) D_{\lambda}(0) d\lambda}$$

A la pràctica això significarà que s'haurà de realitzar el quocient de transformades de Fourier sense preocupar-se de les constants multiplicatives, normalitzant convenientment al final.

Si hom empra un objecte de característiques conegudes, és a dir, si es coneix prèviament $O_p(u)$, només serà necessari calcular $I_p(u)$, que és la transformada de Fourier de la intensitat policromàtica de la imatge $i_p(x)$, que era

$$i_p(x) = \int_{\lambda} R(\lambda) i_{\lambda}(x) d\lambda = \int_{\lambda} R(\lambda) d\lambda \int_{-\infty}^{\infty} E(\lambda) o(\mu) d_{\lambda}(x-\mu) d\mu$$

Com es pot mesurar $i_p(x)$? . En el cas en què el receptor final hagi d'ésser l'ull humà en condicions de visió fotòpica, $R(\lambda)$ serà la de l'observador patró. Per tant, per a avaluar $i_p(x)$ cal un detector que per a cada punt x sumi les $i_{\lambda}(x)$ pesant-les segons $R(\lambda)$. Això es pot fer amb un aparell fotosensible de resposta espectral $R(\lambda)$ que reculli la llum que arriba a x , mitjançant una escletxa, per exemple, i escombrant la imatge aèria.

Al nostre cas concret, aquesta imatge aèria no s'ha d'analitzar directament, sinó que es recull sobre una placa fotogràfica. Després es mesurarà la imatge final, un cop revelada la fotografia, ja que es vol estudiar el procés opto-fotogràfic conjunt.

Com en el cas monocromàtic, s'acostuma a treballar solament amb el mòdul de la funció de transmissió complexa (MFTP).

4.2.-Mètodes de mesura del MFTP

1) Anàlisi de la imatge d'una escletxa objecte

Una entrada convenient per a la mesura del MFTP d'un sistema opto-fotogràfic és la constituïda per un objecte no acolorit, tal com una escletxa. Efectivament, sols caldrà mesurar la intensitat de la seva imatge ja que, calculant el quocient de transformades de Fourier de la imatge i de l'objecte, hom obté directament la funció de transmissió del sistema.

2) Mesura per contrast de la imatge d'un test sinusoidal

En aquest cas, el MFTP del sistema en estudi per a una determinada freqüència espacial es troba per quocient de contrast de la imatge i de l'objecte d'un test de prova constituït per una transparència de variació de transmissió sinusoidal de la citada freqüència.

Aquest mètode resulta, a la pràctica, molt més laboriós que l'anterior, ja que exigeix una mesura per a cada freqüència espacial per a la qual hom vol determinar la funció de transmissió.

5.-EL PROCÉS FOTOGRÀFIC

Si hom analitza la possibilitat d'utilitzar les tècniques de tractament de sistemes lineals invariants al cas concret del procés fotogràfic es troben greus dificultats en la seva aplicació. Això ha donat lloc a diferents solucions, de manera que és possible, en general, definir una funció de transmissió del procés fotogràfic, encara que no sense dificultats i precisions addicionals (Ooue, 1969; Dainty, 1971).

Recordant les dues exigències necessàries per a poder caracteritzar un sistema des del punt de vista d'una funció de transmissió

sió, resulta evident que en el cas del sistema fotogràfic es verifica la condició d'invariància, però no es compleix, en general, la condició de linealitat. De fet, no resulta ni tant sols evident quines són les magnituds que caracteritzen l'entrada i la sortida del sistema. En aquest punt cal fer una puntualització prèvia: cal distingir els casos en què la pel·lícula fotogràfica s'utilitza en un sistema òptic treballant amb llum coherent dels casos en què el sistema opera amb il·luminació incoherent (Goodman, 1972). En tot el que segueix considerarem solament el cas en què la pel·lícula fotogràfica s'utilitza en òptica incoherent.

En el cas de fotografia en blanc i negre, la relació entre l'exposició rebuda per un punt del negatiu i la transmitància de la placa un cop revelada és donada per la corba H-D del procés que es realitza. La mesura de la transmitància en zones microscòpiques de la placa fotogràfica es du a terme mitjançant un microdensitòmetre.

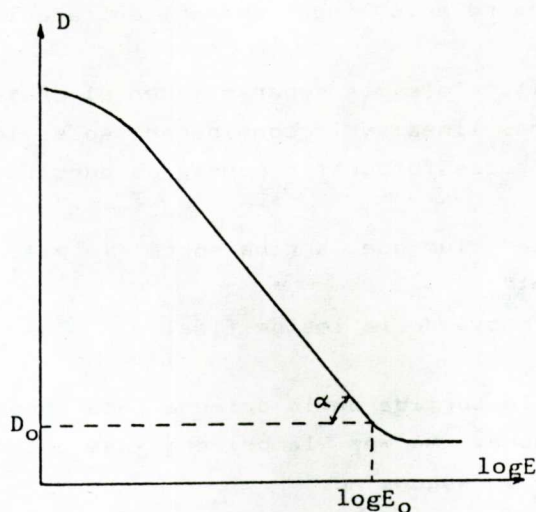
En el cas de fotografia en color, el "gra" de la pel·lícula, un cop revelada, dona lloc a "núvols de tinta", de manera que el resultat final no és un punt opac o transparent, sinó una zona microscòpica amb les següents característiques (Ooue, 1969):

- La seva transparència és selectiva respecte a la longitud d'ona incident.
- La variació de transparència d'una zona serà contínua.
- La transmitància de la zona dependrà de la composició espectral de la llum incident sobre la placa.

Hi ha un cas especialment senzill de tractar, ja que, com es veurà, assegura la linealitat del procés fotogràfic en conjunt: la utilització de pel·lícula inversible en color processada de manera que el seu factor $|\gamma|$ sigui 1.

Quan es tracta de pel·lícula inversible en color, pensada per

a ésser utilitzada amb il.luminació d'una determinada temperatura de color, les densitometries s'hauran de realitzar amb il.luminant de les mateixes característiques. La corba H-D serà, en aquest cas, del tipus següent



Per a la zona rectilínia de la corba resulta

$$D = -\gamma(\log E - \log E_0) + D_0, \quad \text{on } \gamma = \tan \alpha$$

En el cas de treballar amb il.luminació incoherent, la magnitud física característica de l'entrada per a un procés fotogràfic és la intensitat de llum i la magnitud de sortida és la transmitància òptica; d'aquesta manera

$$\log T = \gamma(\log E - \log E_0) - D_0, \quad \text{d'on resulta } T = K I^\gamma$$

essent I la intensitat rebuda per la placa fotogràfica. D'aquesta última expressió es dedueix que la condició de linealitat del sistema òptic (per a aquest parell entrada-sortida) equival a restringir-se a la zona rectilínia de la pel·lícula inversible i

aconseguir un procés de revelat tal que $|\gamma|=1$.

En un cas general (sempre que no emprem una pel·lícula invertible processada en condicions en què $|\gamma|=1$) hom no pot definir directament una funció de transferència del material fotogràfic, ja que no hi ha una relació lineal entre l'entrada i la sortida.

Aquesta dificultat s'evita separant, en el procés fotogràfic total, les fases no lineals, i considerant sols les altres. En aquest sentit el procés fotogràfic consta de dues fases:

- Difusió de la llum que arriba sobre la placa formant una "imatge latent";
- Revelat i formació de la imatge final.

És evident que la sortida de la primera fase constitueix l'entrada de la segona. A més la primera fase pot considerar-se lineal, mentre que la segona no.

6.-FUNCIO DE TRANSMISSIO DE L'ULL I PERCEPCIO DEL CONTRAST

El fet que el receptor final de la imatge obtinguda per un sistema òptic o opto-fotogràfic sigui sempre l'ull humà fa que calgui pensar en la conveniència de tenir-lo en compte quan es tracti d'avaluar la qualitat d'imatges observades.

Si el comportament de l'ull correspongués al d'un sistema lineal invariant hom el podria caracteritzar per la seva funció de transferència i considerar-lo, llavors, com un procés més dels que intervenen en l'obtenció i l'observació d'una imatge.

La part purament òptica del procés de la visió, és a dir, la formació de la imatge sobre la retina per acció del cristal·lí limitat per l'iris, es pot representar correctament des del punt de vista de la funció de transferència. En canvi, "l'apreciació"

d'aquesta imatge formada sobre la retina és un procés de natura psicofísica que no admet una caracterització senzilla i general: no és un procés ni lineal ni invariant.

Una descripció útil de l'acció de la retina, vàlida per a la visió fotòpica d'imatges fixes, és la que es basa en el concepte de "contrast mínim visible", o sia, el valor mínim del contrast d'un test sinusoidal (sobre la retina) d'una determinada freqüència espacial per tal que resulti justament visible.

Amb tot, és usual donar caracteritzacions globals del procés de la visió en el llenguatge de la funció de transmissió. Una possibilitat molt corrent és suposar que la funció de transmissió de l'ull és la inversa de la funció de contrast mínim visible.

En el present treball es consideraran ambdues possibilitats citades en els diferents criteris de qualitat proposats:

- Valorar la intervenció de l'ull a partir de la caracterització separada del sistema òptic i la retina.
- Suposar vàlida una funció de transmissió global mitjana del sistema visual en conjunt.

7.-CRITERIS DE QUALITAT D'IMATGE BASATS EN EL MFTP

Amb el propòsit d'estudiar la seva adequació pràctica en la valoració de la qualitat d'imatge donada per un sistema opto-fotogràfic, s'utilitzen una sèrie de criteris deduïts dels valors del MFTP del sistema emprat i de les diferents caracteritzacions del sistema visual humà particularitzades a les condicions d'observació adoptades.

7.1.-Criteris d'àrea

Alguns dels criteris que s'han considerat en treballs del departament (Navajas, 1980) i que utilitzen també altres autors (Overington, 1973) es defineixen a partir d'àrees obtingudes en suposar coneguda una única funció de MFTP unidimensional representativa del sistema d'obtenció de la imatge fotogràfica:

-Criteri QA1

Segons aquest criteri, la qualitat d'una imatge s'assigna d'acord amb el valor obtingut de la manera següent: es calcula l'àrea de la zona compresa entre els eixos de coordenades i la corba $S(u)$ del MFTP del sistema opto-fotogràfic, i es divideix per l'àrea corresponent de l'instrument ideal (el que compleix $S(u)=1$ per a tota freqüència u). Per raons d'utilitat pràctica es consideren solament les freqüències inferiors a una freqüència de tall u_c i s'assigna qualitat 100 a la de l'instrument ideal.

-Criteri QA2

En aquest cas hom considera la intervenció de l'ull en l'observació de la imatge, suposant que l'observador fa una ponderació d'acord amb una funció de transmissió general del sistema visual humà tal com la proposada per Overington, designada $O_s(u)$ (Overington, 1973). Es normalitza com abans.

-Criteri QA3

Ara, la intervenció de l'ull en la visió es valora suposant vàlida una funció de transmissió global particularitzada a les condicions de visualització adoptades (diàmetre de la pupil·la de l'ull i luminància de l'objecte observat), segons la caracterització deduïda dels resultats de Berger-Lheureux-Robardey, defi-

nint la funció de transmissió de l'ull $O(u)$ com $O(u)=U(u)/W(u)$, on $U(u)$ és la funció de transferència del sistema òptic de l'ull i $W(u)$ la funció de contrast mínim visible retinal (Berger-Lheu-reux-Robardey, 1965). La normalització es fa segons el mateix criteri dels casos anteriors.

-Criteri QA4

Suposant vàlida la mateixa representació de l'acció del procés visual que en el cas anterior, ara es reforça l'acció de les altes freqüències amb un pes $10^{u/uc}$.

-Criteri QA5

Seguint amb la caracterització de la visió proposada al QA3, hom valora l'acció de les altes freqüències per una funció de pes u , és a dir, la pròpia freqüència u .

-Criteri QA6

En el cas present, la caracterització de la intervenció de l'ull es fa a partir de les mateixes dades $U(u)$ i $W(u)$ introduïdes pel QA3, però usades d'una altra manera. Ara es considera l'àrea de la corba producte del MFTP de l'instrument per la $U(u)$ (funció de transmissió del sistema òptic de l'ull) que queda per damunt de la corba de contrast mínim visible per la retina $W(u)$. La normalització és la usual en tots els casos.

Bàsicament, en aquest criteri no s'atribueix una funció de transferència $1/W(u)$ a la retina, sinó que se suposa que solament el contrast superior al valor mínim visible contribueix a la visió de la imatge.

7.2.-Limitacions. Nous criteris

En els criteris proposats hom ha suposat que l'efecte del sistema formador de la imatge es pot representar per una funció $S(u)$ unidimensional única. Això no ofereix ambigüitat quan les zones de treball corresponen a regions centrades a l'eix òptic, ja que llavors, per simetria, es poden caracteritzar per una MFTP unidimensional representativa de qualsevol direcció.

El problema sorgeix quan la funció MFTP bidimensional no té simetria de revolució, és a dir, en regions del camp de l'instrument apartades de l'eix òptic. En aquest cas, hi ha dues direccions privilegiades per a les quals, en el nostre cas, es determinaran els valors del MFTP unidimensional.

Ja se sabia (Navajas, 1982) que, pels criteris de qualitat basats en l'àrea determinada per la funció de transmissió, els valors representatius de la qualitat observada corresponen a una funció de transmissió de valors compresos entre els de la corba mitjana (entre la secció tangencial i la sagital) i la inferior d'aquestes.

Així doncs, s'ha de fer una ponderació major de la corba de valors inferiors quan es tracti d'obtenir un sol valor representatiu de la qualitat, però no es té cap criteri per a determinar la ponderació correcta.

Per tal de superar aquesta dificultat hom proposa la possibilitat d'avaluar la qualitat per un criteri volúmic, en lloc de considerar criteris d'àrea, és a dir, es proposen dos nous mètodes de valoració:

-Criteri QV1

Hom defineix la qualitat d'imatge a partir del nombre que resulta del càlcul del volum interceptat sota la superfície representativa del MFTP en l'espai tridimensional. Aquest volum es calcula a partir del coneixement de les MFTP unidimensionals tangencial i sagital, suposant que les seccions horitzontals són el·líptiques. Aquesta suposició resulta bona a la pràctica quan es tracta de sistemes amb corbes de MFTP de variació suau, com per exemple quan el procés fotogràfic elimina les altes freqüències. El valor de qualitat es normalitza a 100 per a l'instrument ideal. A la pràctica hom considera una freqüència de tall com en els criteris d'àrea.

-Criteri QV2

Només difereix del QV1 perquè, per evitar l'efecte pertorbador dels valors baixos del MFTP a les freqüències altes, només es considera el volum de la zona que queda per damunt del contrast mínim visible per la retina, tal com s'ha fet en criteris anteriors.

Per causa de la normalització adoptada, és evident que els valors numèrics de qualitat obtinguts amb aquests criteris volumèrics seran inferiors als dels criteris d'àrea.

Així doncs, resumint, s'han definit una sèrie de criteris de qualitat basats en àrees determinades per la corba del MFTP aplicables a una funció única representativa de l'instrument formador de la imatge i, a més, dos criteris basats en el caràcter bidimensional de la funció de transmissió.

7.3.-Relació entre els criteris d'àrea i els volúmics

Considerem el volum que, a l'espai tridimensional, determinen la superfície del MFTP i el pla de les freqüències.

Pot expressar-se com

$$V = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(u_x, u_y) du_x du_y$$

o, en coordenades polars,

$$V = \int_0^{\infty} u du \int_0^{2\pi} d\alpha S(u, \alpha)$$

però $(1/2\pi) \int_0^{2\pi} d\alpha S(u, \alpha)$ no és sinó la mitjana dels valors del MFTP bidimensional sobre la circumferència de radi u del pla de les freqüències.

Per tant, en el cas d'una superfície de MFTP amb simetria de revolució (zona d'eix), el criteri volúmic coincideix amb el d'àrea ponderada per la pròpia freqüència (QA5).

8.-REALITZACIONS PRÀCTIQUES

En el nostre cas ens interessa avaluar la qualitat d'imatge donada per un sistema fotogràfic a partir del coneixement del seu MFTP.

És interessant de valorar, a priori, el marge de freqüències espacials que estarà present a les fotografies que s'observaran. És fàcil veure que, de tots els factors que intervenen a la formació de la imatge final (el propi objecte, el sistema òptic, el procés fotogràfic, el sistema projector i el sistema visual humà), el que limita el contingut de freqüències és el procés fotogràfic. De les dades sensitomètriques nominals d'una pel·lícula fotogràfica comercial es dedueix que la seva freqüència de tall és d'unes 50-100 l/mm.

Llavors, primerament, es necessita un test de mesura del MFTP del sistema opto-fotogràfic capaç de cobrir el marge de freqüències d'interès. En el nostre cas s'utilitzà una escletxa construïda amb filtres neutres:

amplada: $5,3 \cdot 10^{-2}$ mm
densitat òptica al centre: 0,3
densitat òptica a les vores: 2,3

D'altra part, cal triar un objecte de prova per a realitzar les comparacions dels observadors. Per a això, s'ha de tenir en compte la necessitat que contingui moltes freqüències espacials i detalls en totes les direccions radials. En el nostre cas, les seves dimensions eren 10x8 cm, de manera que amb l'augment amb què es treballava ($\sim 1/10$ aproximadament) les dimensions de la imatge asseguraven l'isoplanatisme del sistema òptic. L'objecte se situava en un pla perpendicular a l'eix òptic, a una distància de 243 cm de la primera superfície del sistema òptic. Per a les fotografies en camp, l'objecte es desplaçava horitzontalment 22 cm, de manera que l'angle respecte a l'eix era d'uns 5°.

Com a sistema òptic s'adoptà un teleobjectiu fotogràfic:
Meyer-Optik Gorlitz 4154842. Ørestegor

focal: 200 mm
obertura màxima : f/4

Els motius d'aquesta elecció foren els següents:

- és un instrument de bona qualitat,
- és un instrument utilitzat comercialment,
- és un instrument de gran focal, a fi que la imatge no resulti excessivament petita.

Com que el punt de vista adoptat és el de l'estudi de la qualitat d'imatge en relació amb el MFTP, es procurà aconseguir varietat de morfologies de corbes de MFTP, treballant en eix i en camp i amb nombre de diafragma 4 i intermedi entre 8 i 11.

Llavors es determinaren les zones de l'espai-imatge que corresponien a bona qualitat d'imatge obtinguda, fixada la posició de l'objecte, i seleccionant algunes d'aquestes posicions per a enregistrar les proves finals. Per a aquestes mateixes posicions s'enregistrava el test de mesura del MFTP. Mitjançant l'anàlisi d'aquestes fotografies es calculava el MFTP del sistema opto-fotogràfic en les mateixes condicions en què s'obtenien les imatges que s'havien d'observar i comparar. Per a les posicions en camp s'enregistraven dues fotos del test: una que servia per al càlcul del MFTP en direcció tangencial i l'altra per a la del sagital.

Per a possibilitar l'aplicació del concepte de MFTP amb la màxima senzillesa i exactitud, s'adoptà com a pel·lícula de registre fotogràfic la Kodak Ektachrome 5071 en unes condicions d'exposició i processat que garanteixen el compliment de la condició $|\gamma|=1$.

Respecte a la mesura de transmittàncies de la placa, cal tenir present que s'ha de precisar la composició espectral de la llum considerada, fent que sigui la mateixa per a la qual està concebuda la pel·lícula, en el nostre cas concret una temperatura de color de 3200 K.

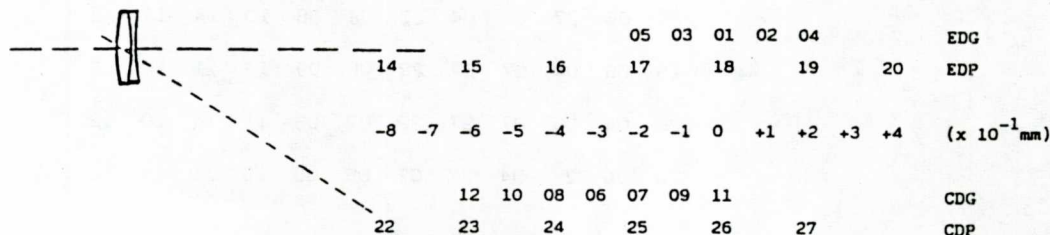
Respecte a les condicions de visualització, les proves es projectaven per parells mitjançant projectors de diapositives idèntics, per tal d'anul·lar-ne la influència. Les distàncies de projecció i observació s'adoptaren amb el criteri que no limitessin més el marge de freqüències present a les proves.

9 RESULTATS.

9.1. Ordenacions dels observadors

Per a tenir una referència per comparar-hi els valors numèrics donats pels diferents criteris de qualitat que s'han definit, s'elaboraà una llista d'ordenacions de qualitat segons l'apreciació d'un conjunt d'observadors.

En total es consideraren 25 proves, numerades d'acord amb l'esquema indicat a la figura.



El pla 0 és el paraxial. Les proves 01,...,05 obtingudes a l'eix i amb nombre de diafragma 4 formen la sèrie EDG. Les proves 14,...,20 obtingudes a l'eix i amb diafragma intermedi entre 8 i

11 formen la sèrie EDP. Ambdues sèries constitueixen l'EIX. De la mateixa manera, les proves obtingudes en camp s'agrupen en les sèries CDG (proves 06,...,12) i CDP (proves 22,...,27), i, conjuntament, formen la sèrie CAMP.

Les ordenacions realitzades pels observadors (designats Obs1,...,Obs5) foren (en ordre decreixent de qualitat)

Obs1	17	18	16	03	19	01	05	24	25	23	15	26	02
Obs2	17	18	16	19	01	03	24	05	25	23	26	15	02
Obs3	18	17	16	03	19	01	24	05	25	23	02	26	20
Obs4	17	18	16	19	03	01	05	24	25	23	02	15	26
Obs5	17	18	16	19	03	01	24	25	05	23	26	02	15

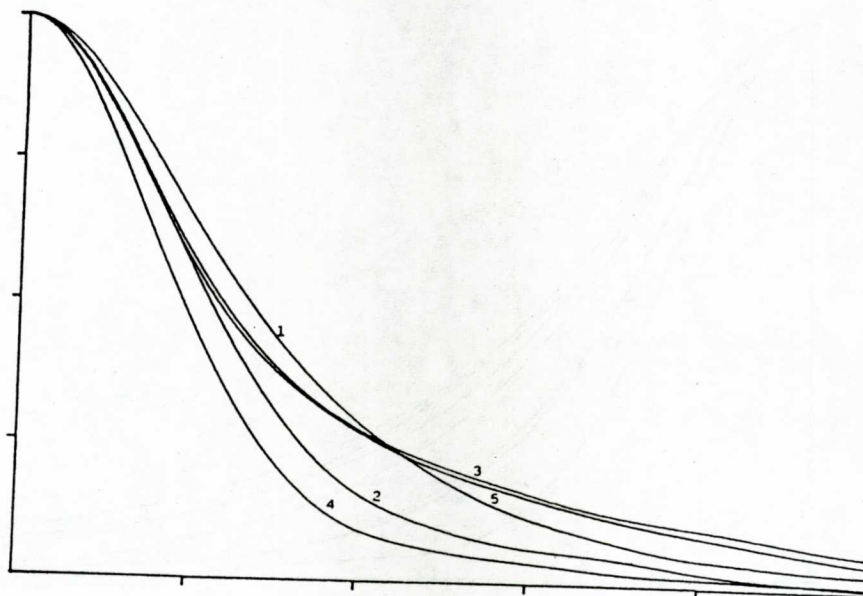
	20	06	07	27	09	04	22	08	11	10	14	12
	20	06	27	07	04	22	09	08	10	14	11	12
→	15	06	04	07	27	22	08	09	14	11	10	12
	20	04	06	07	27	22	09	08	11	14	10	12
	20	06	22	04	27	07	09	08	10	11	14	12

9.2. Ordenacions segons els criteris de qualitat

Els resultats per a la sèrie EDG són

QA1	03 33.12	01 32.34	05 32.21	02 26.24	04 21.84
QA2	01 35.32	03 35.18	05 34.33	02 27.90	04 22.45
QA3	01 37.23	03 36.73	05 35.89	02 29.57	04 23.85
QA4	03 24.72	05 23.75	01 23.17	02 16.67	04 12.39
QA5	03 23.40	05 22.45	01 21.88	02 14.87	04 10.31
QA6	01 39.57	03 39.14	05 38.27	02 32.82	04 27.51
QV1	03 18.39	05 17.21	01 15.48	02 10.21	04 7.39
QV2	01 6.83	03 6.69	05 6.47	02 4.76	04 3.62

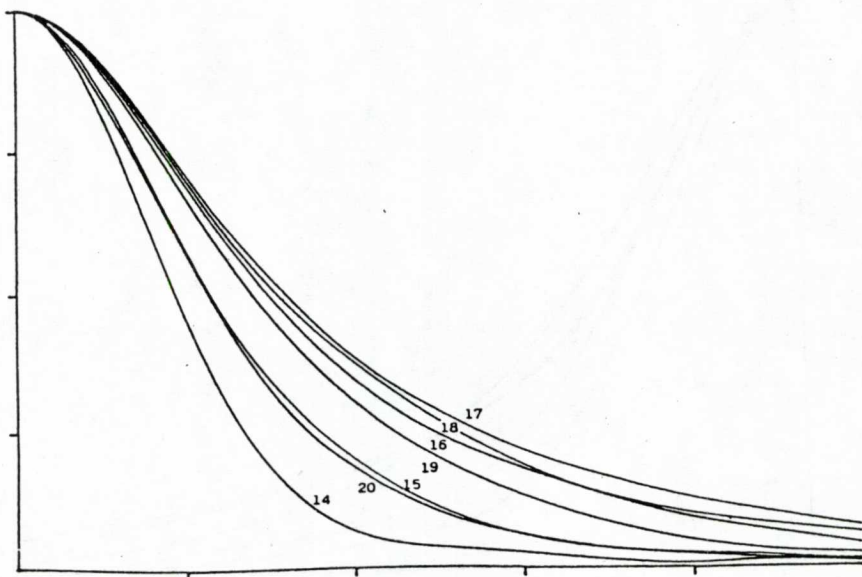
Les gràfiques dels MFTP corresponents són



Per a la sèrie EDP les ordenacions segons els diferents criteris de qualitat són

	17	18	16	19	15	20	14
QA1	39.42	37.34	36.72	33.13	27.23	26.58	21.19
QA2	42.90	41.05	39.97	36.41	29.26	28.46	21.55
QA3	44.79	43.02	41.87	38.39	31.02	30.19	22.92
QA4	31.00	28.67	28.00	23.93	17.68	17.06	11.60
QA5	30.09	27.78	26.92	22.74	15.98	15.32	9.41
QA6	46.56	44.76	43.89	40.60	34.04	33.25	26.82
QV1	23.11	20.44	20.28	15.91	10.99	10.68	6.09
QV2	9.29	8.67	8.22	7.19	5.22	5.00	3.41

Les corbes del MFTP corresponents són



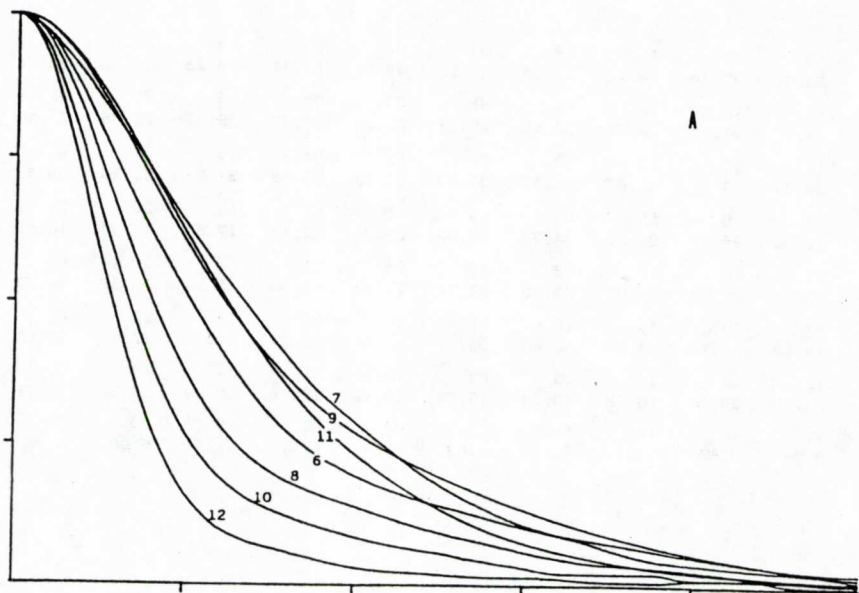
Les valoracions corresponents a la sèrie EIX són

QA1	17 39.42	18 37.34	16 36.72	19 33.13	03 33.12	01 32.34	05 32.21	15 27.23	20 26.58	02 26.24	04 21.84	14 21.19
QA2	17 42.90	18 41.05	16 39.97	19 36.41	01 35.32	03 35.18	05 34.33	15 29.26	20 28.46	02 27.90	04 22.45	14 21.55
QA3	17 44.79	18 43.02	16 41.87	19 38.39	01 37.23	03 36.73	05 35.89	15 31.02	20 30.19	02 29.57	04 23.85	14 22.92
QA4	17 31.00	18 28.67	16 28.00	03 24.72	19 23.93	05 23.75	01 23.17	15 17.68	20 17.06	02 16.67	04 12.39	14 11.60
QA5	17 30.09	18 27.78	16 26.92	03 23.40	19 22.74	05 22.45	01 21.88	15 15.98	20 15.32	02 14.87	04 10.31	14 9.41
QA6	17 46.56	18 44.76	16 43.89	19 40.60	01 39.57	03 39.14	05 38.27	15 34.04	20 33.25	02 32.82	04 27.51	14 26.82
QV1	17 23.11	18 20.44	16 20.28	03 18.39	05 17.21	19 15.91	01 15.48	15 10.99	20 10.68	02 10.21	04 7.39	14 6.09
QV2	17 9.29	18 8.67	16 8.22	19 7.19	01 6.83	03 6.69	05 6.47	15 5.22	20 5.00	02 4.76	04 3.62	14 3.41

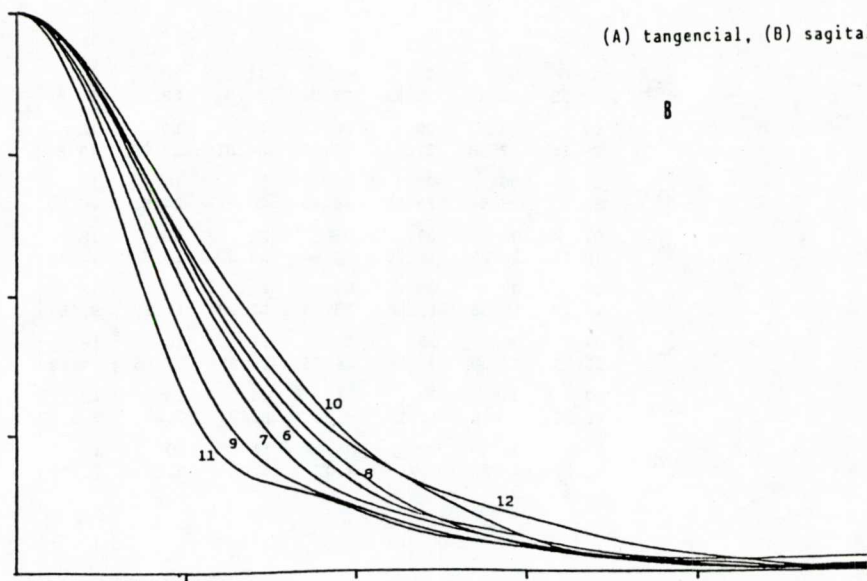
Per a la sèrie CDG les valoracions dels diversos criteris són

QA1	07 27.35	06 26.43	09 25.88	08 23.96	11 23.82	10 22.52	12 19.89
QA2	07 29.16	06 27.98	09 27.42	08 25.02	11 24.81	10 23.29	12 19.90
QA3	07 30.80	06 29.54	09 28.98	08 26.45	11 26.21	10 24.61	12 20.95
QA4	07 18.13	06 17.32	09 16.75	08 14.94	11 14.80	10 13.71	12 11.46
QA5	07 16.47	06 15.63	09 15.04	08 13.13	11 12.98	10 11.88	12 9.55
QA6	07 33.75	06 32.50	09 31.95	08 29.55	11 29.37	10 27.66	12 24.09
QV1	07 11.27	06 11.15	09 10.11	08 8.81	11 8.62	10 7.49	12 5.95
QV2	07 5.11	06 4.73	09 4.71	08 4.07	11 4.02	10 3.68	12 2.90

Les corbes del MFTP són



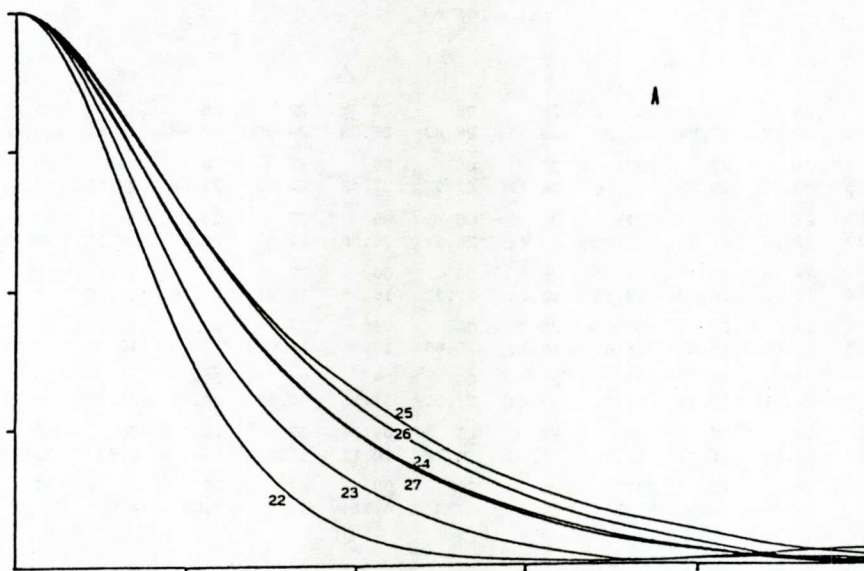
(A) tangencial, (B) sagital

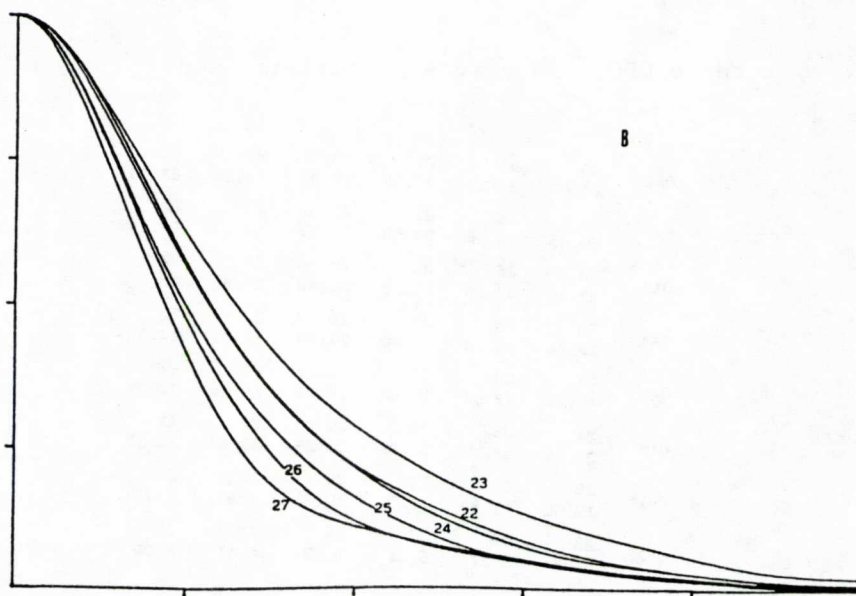


Per a la sèrie CDP, els valors de qualitat són

	24	25	23	26	27	22
QA1	28.40	28.27	27.56	26.95	24.85	23.46
	24	25	23	26	27	22
QA2	30.65	30.46	29.55	28.77	26.13	24.34
	24	25	23	26	27	22
QA3	32.40	32.15	31.22	30.42	27.61	25.77
	25	24	23	26	27	22
QA4	19.24	19.18	18.40	17.74	15.81	14.22
	25	24	23	26	27	22
QA5	17.77	17.66	16.82	16.10	14.06	12.27
	24	25	23	26	27	22
QA6	35.09	34.71	33.99	33.29	30.63	29.13
	25	24	23	26	27	22
QV1	12.00	11.80	11.00	10.72	9.30	7.48
	25	24	23	26	27	22
QV2	5.58	5.57	5.31	5.09	4.33	4.00

Les corbes del MFTP són





En conjunt, per a la sèrie CAMP resulta

QA1	24 28.40	25 28.27	23 27.56	07 27.35	26 26.95	06 26.43	09 25.88	27 24.85	08 23.96	11 23.82	22 23.46	10 22.52	12 19.89
QA2	24 30.65	25 30.46	23 29.55	07 29.16	26 28.77	06 27.98	09 27.42	27 26.13	08 25.02	11 24.81	22 24.34	10 23.29	12 19.90
QA3	24 32.40	25 32.15	23 31.22	07 30.80	26 30.42	06 29.54	09 28.98	27 27.61	08 26.45	11 26.21	22 25.77	10 24.61	12 20.95
QA4	25 19.24	24 19.18	23 18.40	07 18.13	26 17.74	06 17.32	09 16.75	27 15.81	08 14.94	11 14.80	22 14.22	10 13.71	12 11.46
QA5	25 17.77	24 17.66	23 16.82	07 16.47	26 16.10	06 15.63	09 15.04	27 14.06	08 13.13	11 12.98	22 12.27	10 11.88	12 9.55
QA6	24 35.09	25 34.71	23 33.99	07 33.75	26 33.29	06 32.50	09 31.95	27 30.63	08 29.55	11 29.37	22 29.13	10 27.66	12 24.09
QV1	25 12.00	24 11.80	07 11.27	06 11.15	23 11.00	26 10.72	09 10.11	27 9.30	11 8.81	08 8.62	10 7.49	22 7.48	12 5.95
QV2	25 5.58	24 5.57	23 5.31	07 5.11	26 5.09	06 4.73	09 4.71	27 4.33	08 4.07	11 4.02	22 4.00	10 3.68	12 2.90

9.3. Ordenacions totals

Es tracta, ara, de fer una anàlisi detallada de totes les taules de resultats presentades, de manera que se'n puguin treure conseqüències pràctiques.

Tots els criteris, en conjunt, sobrevaloren la qualitat de la prova 07 i subvaloren la de les proves 02, 22 i 04. Si s'analitzen les diferències no comunes a tots els criteris de qualitat, es podran treure conclusions respecte a la validesa de cadascun d'ells en particular.

D'aquesta manera, les ordenacions totals establertes a partir dels criteris QA1, QA2 i QA3 són pràcticament idèntiques i coincideixen amb les dels observadors. Els criteris QA4 i QA5 són equivalents entre si però menys coincidents amb els observadors. El criteri QA6 també origina ordenacions similars a les dels observadors. El criteri QV1 s'ha de considerar inacceptable car presenta divergències molt importants. El criteri QV2 és correcte, de manera similar a QA1, QA2, QA3 i QA6.

10.-CONCLUSIONS

Com a resum dels resultats del present treball, es presenten els següents:

1) S'ha comprovat la possibilitat de mesura del mòdul de la funció de transmissió policromàtica per una única escombrada de la imatge d'una escletxa-objecte il·luminada amb llum blanca. D'aquesta manera no cal realitzar moltes mesures a diferents longituds d'ona.

2) S'han definit una sèrie de criteris de qualitat basats en el MFTP de l'instrument fotogràfic formador de la imatge, estudiant-ne l'adequació pràctica en el camp d'aplicació de la fotogra-

fia en color de tipus comercial.

3) S'han estudiat diversos mètodes per a caracteritzar el procés de la visió. S'han comparat els resultats derivats de considerar una funció de transmissió única pel procés total amb els obtinguts tractant separatament l'acció del sistema òptic de l'ull i la del conjunt retina-cervell. La correlació entre els resultats pràctics per les dues possibilitats és molt gran.

4) En treballs anteriors s'havia determinat que per a valorar la qualitat d'imatge en camp calia considerar una corba de MFTP compresa entre la tangencial i la sagital i més propera a la inferior d'aquestes (per a sistemes de baixa qualitat). S'ha comprovat la validesa del resultat en el cas de sistemes de bona qualitat.

5) A la zona d'eix, constitueixen criteris de qualitat acceptables i de resultat pràctics molt semblants els següents:

- àrea sota la corba del MFTP del sistema,

- àrea sota la corba de funció de transmissió del sistema opto-fotogràfic més el procés visual,

- àrea compresa entre la corba de funció de transmissió del sistema opto-fotogràfic més el sistema òptic de l'ull i la corba del mínim visible retinal.

6) En utilitzar criteris de qualitat basats en l'àrea sota la corba de funció de transmissió que valorin les altes freqüències amb un pes u o $10^{u/c}$, els resultats no són satisfactoris si no s'anul·la l'efecte dels valors baixos de la funció de transmissió a freqüències altes. Això es pot fer adequadament considerant solament l'àrea per damunt de la corba del mínim visible retinal.

7) Per a trobar el factor de ponderació entre el MFTP tangencial i sagital en zona de camp, s'han proposat dos criteris de qualitat basats en el volum tancat sota la superfície representativa del MFTP bidimensional. En aquest cas, els valors d'aquesta funció a freqüències altes influeixen molt en el càlcul del volum i porten a resultats incorrectes. Si s'elimina la intervenció d'aquests valors tal com s'ha indicat, el criteri volúmic és satisfactori.

8) L'avaluació del volum sota la superfície del MFTP bidimensional s'ha fet amb la suposició addicional que les seccions horitzontals de la figura eren sempre el·líptiques. Aquesta suposició es basa en la simetria del problema i en la morfologia de les corbes tangencial i sagital que es tenen calculades.

9) Per a definir una MFTP única del sistema en zones de camp es proposa la funció obtinguda per mitjana de les seccions de la superfície del MFTP bidimensional sobre totes les orientacions en el pla de les freqüències. La utilització de la funció obtinguda d'aquesta manera per a fer valoracions de qualitat per criteris d'àrea porta a resultats molt satisfactoris.

11.-REFERENCIES.

- Baker, L. R., *Optica Acta* **18** 81 (1971).
- Barnden, R., *Optica Acta* **21** 981 (1974).
- Barnden, R., *Optica Acta* **23** 1 (1976).
- Berger-Lheureux-Robardey, M. S. *Revue d'Optique* **44** 294 (1965).
- Dainty, J. C., *Optica Acta* **18** 795 (1971).
- Duffieux, P. M., "L'integrale de Fourier et ses aplications a l'optique". S. A. des imprimeries Oberthur, Rennes (1946).
- Françon, M. "Optique. Formation et traitement des images". Masson et Cie, Editeurs. Paris (1972).
- Frieser, H., *Z. wiss. Photogr.* **37** 261 (1938).
- Goodman, J. W., "Introduction a l'optique de Fourier et a l'holographie". Masson et Cie, Editeurs. Paris (1972).
- Hopkins, H. H., *Proc. Phys. Soc.* **79** 889 (1962).
- Navajas, D., *Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona* (1980).
- Ooue, S., *Progress in Optics* **7** 301 (1969).
- Overington, I., Gullick, S. A., *Optica Acta* **20** 49 (1973).