



UNIVERSITAT^{DE}
BARCELONA

Funció de transmissió òptica policromàtica i criteris de qualitat vàlids per a instruments fotogràfics comercials

Salvador Bosch i Puig



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement 4.0. Espanya de Creative Commons.**

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento 4.0. España de Creative Commons.**

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution 4.0. Spain License.**

FUNCIÓ DE TRANSMISSIÓ ÒPTICA POLICROMÀTICA
I CRITERIS DE QUALITAT VÁLIDS PER A
INSTRUMENTS FOTOGRAFICS COMERCIALS

Tesi presentada a la Universitat de
Barcelona per Salvador Bosch i Puig
per obtenir el grau de Doctor en
Ciències Físiques.



AGRAIMENTS:

Al Dr. José Ramón de Francisco Moneo per la direcció d'aquest treball i la constant disposició d'ajut en la seva realització.

Al Dr. Ignasi Juvells per les profitoses discussions sobre diversos temes de la tesi.

Al Dr. Santiago Vallmitjana i demés companys del Departament per la col·laboració oferta en diferents fases del treball.

A la meva família. A Glòria.



INDEX

1. INTRODUCCIÓ I PROPÒSIT.	1
1.1. Introducció.	2
1.2. Propòsit.	8
2. SISTEMES LINEALS INVARIANTS. CARACTERITZACIÓ.	10
2.1. Transformada de Fourier.	11
2.2. Sistemes lineals invariants.	12
2.3. Tracatament digital de les transformades de Fourier.	16
3. FUNCIÓ DE TRANSMISSIÓ ÒPTICA. FUNCIÓ DE TRANSMISSIÓ ÒPTICA POLICROMÀTICA.	23
3.1. La funció de transmissió òptica.	24
3.2. La funció de transmissió policromàtica.	27
3.3. Mètodes de mesura del mòdul de la funció de transmissió policromàtica.	31
3.3.1. Anàlisi de la imatge d'una escletxa.	
3.3.2. Mesura per contrast de la imatge d'un test sinusoidal.	
3.3.3. Anàlisi de la imatge d'un soroll blanc.	
4. EL PROCÉS FOTOGRÀFIC.	35
4.1. El sistema fotogràfic com a sistema lineal invariant.	36
4.1.1. Fotografia en blanc i negre.	
4.1.2. Mesura de la transmissió.	
4.1.3. Fotografia en color.	
4.2. Caracteritzacions més generals del procés fotogràfic.	43

5. FUNCIO DE TRANSMISSIO DE L'ULL I PERCEPCIO DEL CONTRAST.	47
5.1. Introduccio.	48
5.2. Sistema optic de l'ull.	49
5.3. Accio de la retina.	50
5.4. Caracteritzacions globals de la visio	52
6. MICRODENSITOMETRIA.	56
6.1. Microdensitometre.	57
6.2. Sensibilitat espectral del microdensitometre.	60
6.2.1. Necessitats.	
6.2.2. Calibracio del microdensitometre.	
6.3. Linealitat del microdensitometre.	67
6.4. Utilitzacio practica del microdensitometre.	69
6.4.1. Compliment de les condicions teoriques de mesura.	
6.4.2. Repetibilitat.	
7. CRITERIS DE QUALITAT D'IMATGE BASATS EN EL MFTP.	78
7.1. Criteris de qualitat classics.	79
7.1.1. Imatge d'un estel.	
7.1.2. Test de resolucio.	
7.1.3. Conclusions.	
7.2. Criteris de qualitat basats en el MFTP.	84
7.2.1. Revisio bibliografica.	
7.2.2. Criteris que es proposen per a l'estudi.	
7.2.3. Limitacions. Nous criteris.	
7.2.4. Relacio entre el criteris d'area i els volúmic.	

8. REALITZACIONS PRÀCTIQUES.	99
8.1. Test de mesura del MFTP i objecte de prova utilitzat.	100
8.1.1. Test de mesura.	
8.1.2. Objecte de prova utilitzat.	
8.2. Sistema òptic.	103
8.3. Sistema fotogràfic.	105
8.4. Marge de freqüències.	109
8.5. Comparació experimental de dos mètodes de mesura del MFTP.	112
8.6. Condicions de visualització.	116
9. RESULTATS.	118
9.1. Ordenacions visuals dels observadors.	119
9.2. Valoracions segons els criteris.	125
9.2.1. Proves en eix.	
9.2.2. Proves en camp.	
9.2.3. Ordenacions totals.	
9.2.4. Principals divergències entre criteris i observadors.	
9.3. Contrast o resolució?	136
10. CONCLUSIONS.	138
11. BIBLIOGRAFIA.	143

1.

INTRODUCCIÓ I PROPÒSIT.

1.1. INTRODUCCIÓ.

Un dels primers objectius de l'òptica, tal com concebim actualment aquesta ciència, va ser l'obtenció d'imatges, concretament per a l'observació visual. Naturalment, el progrés havia de passar per obtenir imatges cada vegada millors. Aquest objectiu general és prou ampli per a que no sigui un tema tancat, altrament constitueix un tema de recerca important en molts camps de la ciència i de la indústria.

Un cop superada la fase més primitiva en el disseny i la construcció d'instruments òptics, es va fer 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 va donar lloc a multitud de criteris d'avaluació, cadascun d'ells 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 a la que 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 de ser les línies

que s'observin?, com ha de ser 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 restringint-nos a un determinat camp d'aplicació.

Quines haurien de ser les característiques d'un bon criteri de qualitat? És evident que serien desitjables les següents (Rosenbruch, 1975; Nill, 1976):

- bona correlació amb la qualitat expressada per observadors humans.
- 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.
- amb possibilitat de mesura fàcil i fiable.

Naturalment, no disposant de tal criteri d'avaluació, les necessitats pràctiques van imposar els criteris de qualitat casuístics com a mitjà únic possible, malgrat totes les imprecisions en la definició i amb totes les limitacions que comportava la seva utilització. Així, per exemple, pels astrònoms constituïa un bon criteri de prova per llurs telescopis, l'observació i anàlisi de la imatge d'un estel; pels mi-

microscopistes la prova es realitzava per observació d'algunes mostres concretes seleccionades per contenir molts detalls petits; etc...

En el cas concret de mesurar el poder separador d'un instrument amb un test de barres, es va suggerir (Frieser, 1938) no emprar un objecte que tingués una variació espacial de perfil d'ona quadrada (test de barres), sinó utilitzar un objecte de variació sinusoidal, ja que aquest mantenia el seu 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, tan fàcil d'interpretar des del punt de vista de la teoria de sistemes lineals, pot considerar-se l'inici de l'aplicació dels mètodes d'anàlisi de sistemes, encara que la idea no va ser proposada 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 les components espacials de l'objecte. Com a conseqüència, pot caracteritzar-se 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 que es pot descomposar l'objecte amb que es treballi (Duffieux, 1946). La FTO és una funció complexa i, en molts casos, sols es treballarà amb el seu

mòdul, que es designa abreviadament MFT.

L'any 1948 varen ser Selwyn, en el camp de la fotografia, i Schade, en el de la televisió, qui seguiren aplicant les idees anteriors, que restaven oblidades per a la majoria dels investigadors de l'època.

Durant la següent dècada es van desenvolupar aparells destinats a la mesura de la FTO d'instruments. Simultàniament, va ser principalment Hopkins qui va establir les bases teòriques per a l'aplicació de la idea de la funció de transmissió òptica (Hopkins, 1962).

Amb tot això anaven quedant clars els avantatges que podia tenir l'especificació de la qualitat de les imatges i dels instruments mitjançant la FTO, tant des del punt de vista científic com de l'industrial. Realment, les característiques de la FTO s'assemblaven bastant a les ideals d'un bon criteri de qualitat.

De totes maneres, no resultava 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 en 1966, es va proposar d'elaborar un conjunt de lents patró que poguessin servir com a test de prova per a que els diferents laboratoris provessin els seus equips de mesura de la FTO. Per a coordinar i impulsar aques-

ta col.laboració internacional, l'institut SIRA va iniciar en 1967 el projecte "Assesment and specification of image quality", al mateix temps que s'elaborava un conjunt de lents patró que es van utilitzar per a efectuar comparacions de mesures entre diferents laboratoris (Baker, 1970).

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

Un dels motius d'aquesta utilitat de la FTO, és la possibilitat de multiplicar les FTO dels subsistemes que formin un sistema per a obtenir la FTO d'aquest. Per a 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 sols és aplicable per a sistemes treballant amb il.luminació incoherent.

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 projectant-la sobre una pantalla mitjançant un projector de diapositives convencional.

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 resulta de poca importància en sistemes d'alta qualitat, però que podrien ser importants en sistemes amb lents no polides o brutes. En 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 radials. 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 vindria representat per una superfície en un espai tridimensional on les variables independents són les freqüències espaials.

Una definició equivalent pel 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

a la mateixa.

Aquestes definicions equivalents, però aparentment diferents, donen lloc als diversos mètodes de mesura segons es consideri l'un o l'altres aspecte.

1.2. PROPÒSIT.

Com ja s'ha dit a l'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 que 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 seva major facilitat de mesura experimental.

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

El que es pretén en el present treball és estudiar les condicions d'aplicació del MFTP per a l'avaluació conjunta d'un sistema opto-fotogràfic, es a dir un sistema òptic que

forma una imatge que és recollida per una placa fotogràfica.

Per tant, primerament es tractarà la teoria i les condicions de mesura d'aquest MFTP i, en un segon pas, es definiran i analitzaran criteris de qualitat basats en el MFTP, estudiant la seva adequació per comparació amb valoracions realitzades per diversos observadors.

Per a tot, es treballarà amb llum blanca i objecte en color i es tractarà solament amb imatges finals de bona qualitat, de manera que es rebutjaran les proves fotogràfiques que es considerarien inacceptables a nivell de fotografia comercial.

2.

SISTEMES LINEALS INVARIANTS. CARACTERITZACIÓ.

2.1. TRANSFORMADA DE FOURIER.

Sigui $f(x)$ una funció, real o complexa, d'una variable real x . Es defineix la seva transformada de Fourier com

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-i2\pi ux) dx$$

Sota condicions matemàtiques molt generals, que sempre es compliran en els casos d'interès pràctic, es pot garantir l'existència de la transformació.

Les propietats de la transformada de Fourier són prou conegudes. Per a un desenvolupament matemàtic general es poden consultar obres especialitzades (Papoulis, 1968).

Una propietat bàsica de la transformació de Fourier és la de la inversió. Efectivament, amb la notació anterior

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u) \exp(i2\pi ux) du$$

el qual expressa que $f(x)$ és la transformada inversa de Fourier de $F(u)$.

Tot això s'escriu, abreviadament,

$$F(u) = \mathcal{F} [f(x)]$$

$$f(x) = \mathcal{F}^{-1} [F(u)]$$

La variable x , en el cas que ens ocuparà, té dimensions d'espai i la variable u les inverses. Es diu que u és una freqüència espacial.

2.2. SISTEMES LINEALS INVARIANTS.

Un sistema físic general es pot considerar equivalent a un operador matemàtic que transforma una funció (senyal d'entrada) en una altra (senyal de sortida).

Des d'aquest punt de vista, sistema lineal és aquell que respon linealment a les entrades que rep, o sigui, "la sortida del sistema corresponent a la suma de dues entrades no és altra que la suma de les sortides que originaria el sistema per a cada entrada independentment".

Sistema invariant és aquell que compleix que "les respostes que dona a dues entrades desplaçades entre si sols difereixen entre elles en un desplaçament".

Ès important fer notar que aquestes definicions de sistema lineal i de sistema invariant són absolutament generals en el sentit que no presuposen cap característica addicional respecte a les entrades i a les sortides. Així, per exemple, l'entrada o la sortida d'un sistema físic pot ser una funció qualsevol de variació temporal, espacial, etc... En cada cas, per a aplicar els resultats que es deduiran a continuació, sols cal identificar les variables i les funcions que corresponen

al problema en estudi.

La importància dels sistemes lineals invariants està en la possibilitat de caracteritzar-los mitjançant el que s'anomena "funció de transmissió" o "funció de transferència" del sistema. Efectivament, per a determinar el comportament d'un sistema lineal invariant sols cal conèixer la sortida que produeix per a una entrada del tipus $\delta(x)$. La resposta a un impuls unitari centrat a $x=0$ s'anomena "funció de resposta impulsional" del sistema i es designarà $h(x)$. Llavors, si el sistema rep una entrada arbitrària $e(x)$, es pot suposar que aquesta entrada està formada per un conjunt d'impulsos de diferent magnitud i desplaçats entre si, de manera que la sortida que donarà el sistema és la suma de les respostes als impulsos d'entrada.

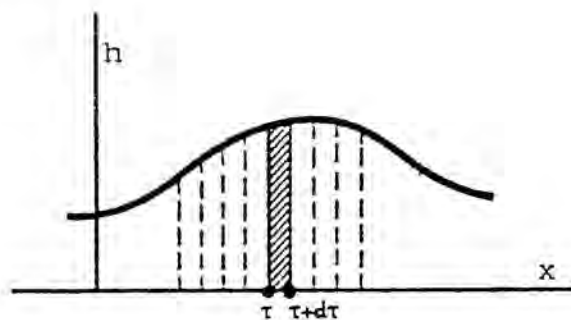


FIGURA 2-1 .- Descomposició d'una entrada arbitrària en suma d'impulsos.

Si $h(x)$ representa la resposta per a cada valor de x , quan l'entrada és un impuls unitari aplicat a 0, llavors $h(x-\tau)$ és la resposta a un impuls unitari aplicat a τ , per ser el sistema invariant respecte de la variable espacial de la que depenen les funcions.

La magnitud de l'impuls que correspon a l'entrada entre τ i $\tau + d\tau$ és $e(\tau) d\tau$.

La resposta que origina el sistema per aquest impuls és

$$e(\tau) d\tau h(x-\tau)$$

Esquemàticament, l'àrea ratllada de la figura contribueix en $e(\tau) d\tau h(x-\tau)$ a la resposta total en el punt x .

Finalment, per ser el sistema lineal, la sortida serà

$$s(x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x-\tau) e(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} h(\theta) e(x-\theta) d\theta$$

"la sortida del sistema és la convolució de l'entrada i la resposta impulsional".

Calculant la transformada de Fourier de la funció sortida, amb les notacions usuals:

$$\begin{aligned} S(u) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} h(\theta) e(x-\theta) d\theta \right) \exp(-i2\pi ux) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} d\theta h(\theta) \int_{-\infty}^{\infty} e(x-\theta) \exp(-i2\pi ux) dx \end{aligned}$$

fent $\tau = x - \theta$, resulta

$$\begin{aligned} S(u) &= \int_{-\infty}^{\infty} d\theta h(\theta) \int_{-\infty}^{\infty} e(\tau) \exp(-i2\pi u\theta) \exp(-i2\pi u\tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} d\theta h(\theta) \exp(-i2\pi u\theta) \int_{-\infty}^{\infty} e(\tau) \exp(-i2\pi u\tau) d\tau \end{aligned}$$

o sigui

$$S(u) = H(u) E(u)$$

sent $H(u)$ la transformada de Fourier de la resposta impulsional $h(x)$ o "funció de transmissió" del sistema.

Resumint, el sistema actua en l'espai freqüencial multipliant l'entrada per la funció de transmissió del sistema per a produir la sortida.

Un altre mètode per a caracteritzar els sistemes lineals invariants és considerar la resposta que donen a entrades harmòniques, o sigui, d'una sola component freqüencial. Suposem que la entrada és

$$e(x) = e_0 \cos(2\pi u_0 x)$$

la seva transformada de Fourier serà

$$E(u) = \frac{e_0}{2} (\delta(u-u_0) + \delta(u+u_0))$$

i la transformada de Fourier de la sortida corresponent complirà

$$S(u) = H(u) E(u)$$

Com serà la sortida $s(x)$?

$$\begin{aligned} s(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} S(u) \exp(i2\pi ux) \, du \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} H(u) \frac{e_0}{2} (\delta(u-u_0) + \delta(u+u_0)) \exp(i2\pi ux) \, du \\ &= \frac{e_0}{2} (H(u_0) \exp(i2\pi u_0 x) + H(-u_0) \exp(-i2\pi u_0 x)) \end{aligned}$$

Però quan la funció $h(x)$ és real resulta que $H(u_0) = H^*(-u_0)$

d'on

$$s(x) = e_0 \operatorname{Re}(H(u_0) \exp(i2\pi u_0 x))$$

però $H(u_0) = |H(u_0)| \exp(i2\pi\phi)$

d'on es dedueix, finalment,

$$s(x) = e_0 |H(u_0)| \cos(2\pi u_0 x + \phi)$$

de manera que la sortida també és harmònica, quedant la seva amplitud multiplicada per $|H(u_0)|$ i la fase incrementada en ϕ .

2.3. TRACTAMENT DIGITAL DE LES TRANSFORMADES DE FOURIER.

Suposem que es vol calcular la transformada de Fourier de la funció $f(x)$ de la que sols es coneixen els N valors següents:

$$f(-\frac{N}{2}\Delta), f((-\frac{N}{2}+1)\Delta), \dots, f(0), \dots, f((\frac{N}{2}-1)\Delta)$$

sent N un nombre parell. Aquests valors poden procedir, per exemple, de les lectures d'un aparell de mesura corresponents a intervals regulars Δ (interval de digitalització). Per tant, sols es coneix la funció $f(x)$ digitalitzada a intervals Δ i en una zona X tal que $X = N\Delta$.

Matemàticament això equival a conèixer

$$f_d(x) = (f(x) \text{ rect}(x)) \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(x-n\Delta)$$

sent $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } -\frac{X}{2} \leq x < \frac{X}{2} \\ 0, & \text{en altre cas} \end{cases}$

Si no hi ha aliasing, és a dir, si el senyal d'entrada no conté freqüències superiors a $1/2\Delta$, el terme (1) sols origina la repetició periòdica de l'autèntic espectre de $f(x)$.

El terme (3) fa que el coneixement de $F_{dp}(u)$ sols es produeixi per a valors de u a intervals $1/X$.

Donat que $F(u) = F^*(-u)$, suposant condicions de digitalització adequades per a que no hi hagi aliasing, la funció $F_{dp}(u)$ tindrà l'aspecte següent:

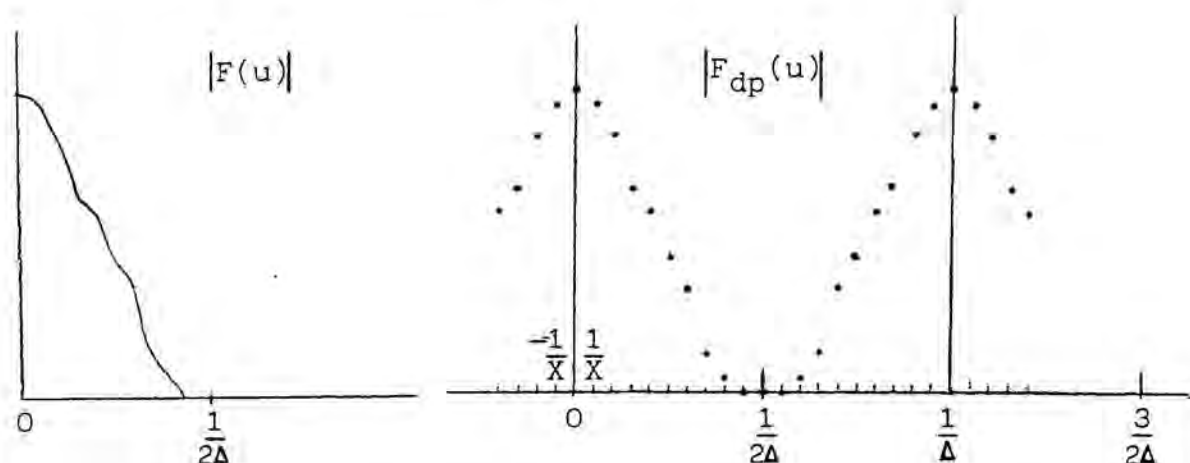


FIGURA 2-2 .- Relació entre la funció $|F(u)|$ i la funció $|F_{dp}(u)|$.

Resumint, solament $N/2 + 1$ dels valors de $F_{dp}(u)$ donen informació, corresponent (sense comptar l'efecte del terme (2) i sense aliasing) als valors de $F(u)$ per a les freqüències $0, 1/X, 2/X, \dots, (N/2) / X$.

Com es calculen aquests valors de $F_{dp}(u)$ a partir de tot el que s'ha exposat? Cal tenir present que tan sols es disposa dels N valors de partida de la funció $f(x)$. D'acord amb les notacions anteriors resulta

$$\begin{aligned}
F_{dp}(u) &= \int_{-\infty}^{\infty} f_{dp}(x) \exp(-i2\pi ux) dx \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} ((f(x) \operatorname{rect}(x) \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(x-n\Delta)) \otimes \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(x-nX)) \exp(-i2\pi ux) dx \\
&= \left(\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \delta(x-n\Delta) \exp(-i2\pi ux) dx \right) \frac{1}{X} \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(u-\frac{n}{X}) \\
&= \left(\sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x-n\Delta) \exp(-i2\pi ux) dx \right) \frac{1}{X} \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(u-\frac{n}{X}) \\
&= \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} f(n\Delta) \exp(-i2\pi un\Delta) \frac{1}{X} \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(u-\frac{n}{X})
\end{aligned}$$

Per tant, en les condicions esmentades en que $F_{dp}(u)$ i $F(u)$ coincideixen en l'interval $0 \leq u \leq 1/2\Delta$, els valors de $F(u)$ per a les freqüències $u = 0, 1/X, 2/X, \dots, (N/2)/X$, s'obtenen calculant l'expressió

$$\frac{1}{X} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} f(n\Delta) \exp(-i2\pi un\Delta)$$

on $f(n\Delta)$ són els valors coneguts de la funció $f(x)$.

Tot i la senzillesa d'aquesta expressió, el seu tractament numèric requereix un gran nombre d'operacions matemàtiques, amb el conseqüent temps de càlcul i errors de truncació en els resultats.

La introducció dels ordinadors i el desenvolupament de l'algorisme FFT ("Fast Fourier Transform") ha reduït el temps de càlcul i ha incrementat la precisió aconseguida (Cooley & Tukey, 1965). La utilització dels mètodes de l'anàlisi de Fourier és una tècnica usual en diferents camps científics i es

poden trobar tractaments introductoris a la teoria de sistemes lineals en llibres de mecànica (Newland, 1975), electrònica, òptica, etc. També hi ha obres centrades en el tractament del algorisme FFT pel càlcul de transformades de Fourier en general (Brigham, 1972).

Si es vol calcular, a la pràctica, el mòdul de la funció de transferència d'un sistema, resulten immediats tres mètodes de mesura:

- a) Càlcul per transformada de Fourier de la resposta del sistema a una entrada del tipus "funció rectangle".
- b) Càlcul per mesura de la modulació de la resposta del sistema a una entrada de variació sinusoidal.
- c) Càlcul per transformada de Fourier de la resposta del sistema a un "soroll blanc" d'entrada.

Analitzem les tres possibilitats.

a) Si l'entrada del sistema en estudi és una funció rectangle, el mètode de càlcul consistirà simplement en analitzar la sortida, calculant la seva transformada i dividint, freqüència a freqüència, per la transformada de Fourier de l'entrada, que és una funció tipus sinc.

La conveniència d'aquest mètode de càlcul es basa en els fets següents:

- la funció rectangle és fàcil de construir.
- si és prou estret, té un important contingut d'altres

freqüències, de manera que al fer la divisió citada no s'introdueixen errors importants malgrat actuar la transformada de l'entrada com a divisor. Concretament, la divisió a efectuar és la dels mòduls de les transformades.

La transformada de Fourier de la sortida es podrà calcular mitjançant les tècniques citades, mentre que la de la funció entrada es coneix per davant si es determina solament l'amplada del rectangle. És convenient triar aquesta amplada de manera que el marge de freqüències d'interès quedi dins el primer lòbul de la funció sinc corresponent. En l'anàlisi de la sortida s'ha de comprovar que no es produeix el fenomen d'aliasing.

b) Si l'entrada al sistema és una funció tal com

$$e = k + e_0 \cos(2\pi u_0 x)$$

la sortida serà

$$s = k |H(0)| + e_0 |H(u_0)| \cos(2\pi u_0 x + \phi)$$

El contrast, o modulació, de l'entrada és

$$c_0 = \frac{k + e_0 - k - e_0}{k + e_0 + k - e_0} = \frac{e_0}{k}$$

Per a la sortida

$$c_i = \frac{e_0 |H(u_0)|}{k |H(u_0)|}$$

Llavors, el quocient de contrastes és

$$\frac{c_i}{c_0} = \left| \frac{H(u_0)}{H(0)} \right|$$

La utilització pràctica d'una entrada de les característiques citades (test sinusoidal) presenta una sèrie de dificultats:

- la seva construcció no és fàcil.
- no pot contenir mai un nombre infinit de períodes, de manera que s'ha de tenir en compte l'error que s'origina per la truncació.
- sols seveix per a calcular el mòdul de la funció de transmissió per a una sola freqüència.

c) En aquest cas la funció d'entrada al sistema és un "soroll blanc", és a dir, un senyal de contingut freqüencial uniforme per a totes les freqüències.

En aquest cas particular, l'entrada té un valor constant per al mòdul de de la transformada de Fourier, de manera que la transformada de la sortida correspon directament a la funció de transmissió del sistema en estudi. Realment, no és necessari que el mòdul de la transformada de l'entrada sigui constant en el marge de freqüències que ens interessa, ja que sempre es podrà realitzar la divisió de les transformades de Fourier de sortida i entrada. El que és imprescindible és que l'entrada contingui tot el marge de freqüències en estudi amb valors del mòdul de la transformada apreciables.

3.

FUNCIÓ DE TRANSMISSIÓ ÒPTICA.

FUNCIÓ DE TRANSMISSIÓ ÒPTICA POLICROMÀTICA.

3.1. LA FUNCIO DE TRANSMISSIO OPTICA.

Es sabut que un sistema òptic treballant amb objecte il·luminat amb llum quasi-monocromàtica incoherent és un sistema lineal respecte a les intensitats de llum (Françon, 1972).

Es a dir, si suposem que l'objecte és una certa distribució d'intensitats $o(x,y)$, 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 d'aquestes magnituds.

En endavant, per a simplificar, es suposarà que l'augment lateral del sistema és la unitat o , equivalentment, que l'entrada del sistema és la imatge ideal que obtindríem segons les lleis de l'òptica geomètrica.

Per altra part, un sistema òptic no és espacialment invariant (isoplanàtic). Per a que així fos caldria que la imatge d'un punt objecte canviés de lloc i no de forma al canviar la posició del citat punt objecte dins del camp de treball de l'instrument.

Amb tot, si es divideix el camp objecte en zones petites, en cada una d'elles es pot considerar aproximadament que el sistema es comporta com isoplanàtic, amb el qual, complint-se

aquesta condició juntament amb la de linealitat, es podrà definir una funció de transmissió per a aquella zona del camp, o, el que és equivalent, existirà una funció de resposta impulsional característica de la zona considerada que es designarà $h(x,y)$.

La significació d'aquesta resposta impulsional en la zona considerada és la mateixa que en el cas unidimensional, de manera que

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

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.

Desenvolupant la teoria de sistemes lineals i de la funció de transmissió pel cas bidimensional s'arriba (Goodman, 1972) a l'expressió

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

on

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

és la transformada de Fourier (bidimensional) de la resposta impulsional (bidimensional).

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

$$H(u,v) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\xi,\eta) \exp(-i2\pi(u\xi+v\eta)) d\xi d\eta}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\xi,\eta) d\xi d\eta}$$

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 algunes direccions privilegiades.

En el cas particular de treballar amb objecte en eix, la funció $H(u,v)$ tindrà simetria radial, de manera que quedarà perfectament caracteritzada sabent, per exemple, $H(u,0)$ que correspon a la funció de transmissió unidimensional definida per objectes que solament 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, es a dir, la funció d'extensió de la línia.

3.2. LA FUNCIÓN DE TRANSMISIÓN POLICROMÁTICA.

Per a poder definir una funció de transmissió policromàtica, és a dir, una funció de transmissió per a un sistema òptic operant amb 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, Barnden, 1976).

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

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

on $E(\lambda)$ és la composició espectral de la llum que arriba a l'objecte. D'aquesta manera, la intensitat total emetida per un punt de l'objecte x , serà

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

sent $o(x)$ la transmitància o reflectància del punt, que sols ha de ser 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

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

on

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

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

Per altra part, la funció de transmissió per a cada λ és

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

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

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

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

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

$$\frac{I_p(u)}{O_p(u)} = \frac{\int_{\lambda} R(\lambda) E(\lambda) d\lambda \int_{-\infty}^{\infty} d_{\lambda}(\xi) \exp(-i2\pi u\xi) d\xi}{\int_{\lambda} E(\lambda) d\lambda}$$

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

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

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

o, equivalentment, com

$$\frac{I_p(u)/O_p(u)}{I_p(0)/O_p(0)}$$

en 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 s'utilitza un objecte de característiques conegudes, és a dir, si es coneix prèviament $O_p(u)$, sols serà necessari calcular $I_p(u)$, que és la transformada de Fourier de la intensitat policromàtica de la imatge $i_p(x)$, que era

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

La definició que s'ha donat de la FTOP coincideix amb la que es proposa a la bibliografia del tema, simplificant al màxim el càlcul en la suposició única de que es pot obtenir $i_p(x)$ (Shmyga, 1974; Takeda, 1981)

Com es pot mesurar $i_p(x)$? En el cas en que el receptor final hagi de ser l'ull humà en condicions de visió fotòpica, $R(\lambda)$ serà la del observador patró. Per tant, per a avaluar $i_p(x)$ es precisa un detector que para 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 solament 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'analitzarà directament, sinó que es recull sobre una placa fotogràfica. Després es mesurarà sobre la imatge final, un cop revelada la fotografia (diapositiva), per a estudiar el procés opto-fotogràfic conjunt.

Les condicions de validesa d'aquest procediment de treball quedaràn supeditades a la linealitat del procés fotogràfic que s'afegeix al sistema òptic.

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

Suposant que el procés opto-fotogràfic conjunt compleix els requeriments teòrics exposats, cal analitzar els mètodes de mesura del MFTP.

3.3. MÈTODES DE MESURA DEL MÒDUL DE LA FUNCIO DE TRANSMISSIÓ POLICROMÀTICA.

Com a conseqüència del tractament teòric exposat en el capítol anterior i en els proppassats apartats d'aquest, es proposen tres possibles mètodes de mesura.

3.3.1. Anàlisi de la imatge d'una esclatxa objecte.

Una entrada convenient per a la mesura del MFTP d'un sistema opto-fotogràfic, és la constituïda per un objecte no colorejat tal com una esclatxa. És clar que en aquest cas es complirà la condició bàsica per a l'aplicabilitat del concepte de funció de transmissió policromàtica, o sigui

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

Concretament, es va construir una esclatxa mitjançant filtres neutres Kodak nº 96, de densitats òptiques 0,3 i 2,0 de manera que la transmissió de la part clara corresponia a la densitat 0,3 i la de la part fosca a densitat 2,3. L'amplada de l'esclatxa era de $5,3 \cdot 10^{-5}$ metres. La funció intensitat de l'objecte - coordenada espacial era la representada a la figura 3-1.

Sols caldrà mesurar les intensitats a la imatge amb un aparell que faci la ponderació $R(\lambda)$.

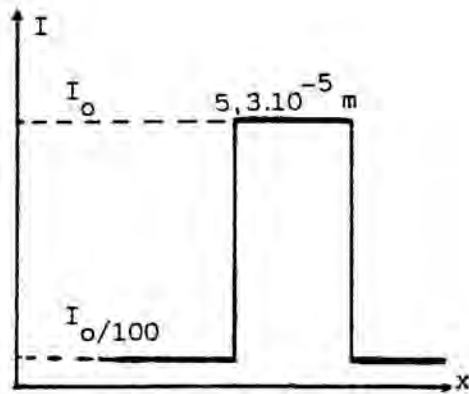


FIGURA 3-1 .- Entrada utilitzada en el càlcul del MFI mitjançant anàlisi de la imatge d'una esclatxa.

3.3.2. Mesura per contrast de la imatge d'un test sinusoidal.

En aquest cas s'han de tenir en compte les dificultats apuntades a 2.3.b). Concretament, no és fàcil obtenir un objecte que presenti una intensitat d'emissió de variació sinusoidal. Alguns dels mètodes utilitzats per a aconseguir-ho són els següents:

a) registre fotogràfic d'algun tipus d'interferències, de tal manera que la imatge final sigui una transparència de perfil sinusoidal, que, al ser il·luminada per transmissió, representi l'objecte desitjat (Moneo, 1977).

b) utilitzar com objecte la imatge donada per una lent cilíndrica d'un original amb variació espacial en perfil d'ona quadrada (Selwyn, 1948).

En el nostre cas concret es consideraran dos altres mètodes per a la construcció del test sinusoidal adequat a les necessitats del problema plantejat:

i) reproducció fotogràfica d'un test sinusoidal ja existent, de manera que per variació de l'augment en la reproducció es modificava la freqüència espacial de la sèrie obtinguda, adequant-la al marge de freqüències en estudi; naturalment, per a això calia realitzar un procés fotogràfic que no distorsionés el perfil sinusoidal original.

ii) registre fotogràfic de la imatge generada sobre una pantalla de televisió per un ordinador, calculada de manera que el resultat final del procés sigui un negatiu de transmissió sinusoidal.

Aquest últim mètode es va descartar pel fet de que no es disposava, en el moment de realitzar la construcció, del sistema de pantalla de televisió adequadament calibrat.

Es va optar, doncs, per la reproducció fotogràfica reduïda del test del que es disposava, de manera que s'obtinguessin sèries del marge de freqüències desitjat: fins a 5 línies per mil·límetre (que correspondran a unes 50 en la imatge posterior).

Respecte a la truncació del test sinusoidal, que és un altre dels problemes que presenta aquest mètode de mesura, s'ha de pensar que és inevitable pel fet de que és impossible treballar amb un nombre infinit de períodes en la sinusoïde. En el nostre cas, la truncació del test del que es disposava corresponia a unes condicions conegudes, de manera que es podia corregir el seu efecte sobre el contrast de la imatge per

un cert valor numèric conegut (Moneo, 1977). Per les condicions de reproducció, la truncació del test obtingut era similar, de manera que, en principi, era corregible l'efecte de la truncació en el contrast de la imatge i, per tant, en la mesura del MFTP per aquest mètode.

Amb tot, el fet de treballar amb pocs períodes introduïa altres efectes, sobre tot en la fase de revelat del negatiu fotogràfic. Aquests efectes s'analitzaran en un capítol posterior.

3.3.3. Anàlisi de la imatge d'un "soroll blanc".

La dificultat d'aquest mètode està en disposar d'un objecte de contingut freqüencial constant en la banda espectral d'interès. Es va pensar en generar el citat objecte mitjançant un programa d'ordinador, visualitzant-lo sobre una pantalla de televisió i fotografiant-lo.

Aquest mètode no es va dur a terme per les dificultats d'utilització de la pantalla de TV en el seu moment.

4.

EL PROCÉS FOTOGRÀFIC.

El procés fotogràfic és un pas usual en la realització d'una experiència en òptica, a més de ser un dels mètodes més corrents d'emmagatzement de la informació. Des del nostre punt de vista, considerarem el procés fotogràfic com una part del procés en estudi, de manera que es vol incloure el seu efecte en la formació de la imatge final i no pas restringir-lo a una forma de registre de la informació referent als anteriors processos.

Tal com s'ha dit, analitzarem el conjunt:

- formació de la imatge pel sistema òptic.
- registre fotogràfic d'aquesta imatge.

Donat que el propòsit del treball és la caracterització d'ambdues etapes per una funció de transmissió única, cal analitzar, en particular, en quines condicions pot fer-se per a la segona d'elles.

4.1. EL SISTEMA FOTOGRÀFIC COM A SISTEMA LINEAL INVARIANT.

Si s'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 maneres de solventar-les, de forma que és possible, en general, definir una funció de transmissió pel 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, 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.

Efectivament, la invariància equival a suposar uniformitat i no direccionalitat en la pel·lícula utilitzada, el qual serà ben normal en productes comercials de bona qualitat.

Respecte a la linealitat, en canvi, no resulta ni tan sols evident quines són les magnituds que caracteritzen l'entrada i la sortida del sistema. En aquest punt es pot fer una puntualització prèvia: s'han de distingir els casos en que la pel·lícula fotogràfica s'utilitza en un sistema òptic treballant amb llum coherent dels casos en que el sistema opera amb il·luminació incoherent (Goodman, 1972). Considerarem solament el cas en que la pel·lícula fotogràfica s'utilitza en òptica incoherent.

4.1.1. Fotografia en blanc i negre.

La placa fotogràfica no exposada consta de grans d'halogenur de plata que es troben en suspensió dins de gelatina i

distribuïts en una capa uniforme sobre una base plàstica estable.

El procés físic de l'exposició fotogràfica consisteix, molt resumidament, en que els grans d'halogenur (que són fotosensibles) absorbeixen l'energia lluminosa que els arriba, sofrin un canvi físic complex, de naturalesa quàntica. Els grans que han absorbit una quantitat de llum suficient contenen, després de l'exposició, petites quantitats de plata metàl·lica.

Si la pel·lícula, un cop exposada, es sotmet a un procés químic adequat, anomenat "revelat", els grans d'halogenur que contenen gens de plata metàl·lica canvien totalment a plata metàl·lica. Els altres grans d'halogenur no sofreixen cap transformació en el revelat. En un següent pas, aquesta placa revelada es sotmet al "fixat", el qual consisteix en eliminar l'halogenur restant per un procés químic, impossibilitant, al mateix temps, posteriors transformacions. D'aquesta manera s'obté el "negatiu fotogràfic".

Els grans de plata són opacs, de manera que la opacitat del negatiu dependrà de la densitat de grans de plata en la zona considerada. La relació quantitativa entre aquests conceptes ve donada per la llei de Hurter-Driffield (abreviadament H-D). Aquests autors van mostrar que, si es defineix la transmitància en intensitats de llum de la placa revelada en un entorn microscòpic del punt (x,y) com la funció

$$T(x,y) = I_t(x,y) / I_i(x,y)$$

on $I_t(x,y)$ és la intensitat transmesa i $I_i(x,y)$ la incident, llavors la massa de plata present en el punt (x,y) per unitat de superfície és proporcional a $\log\left(\frac{1}{T}\right)$. Per aquest motiu, es denomina "densitat fotogràfica" a

$$D = \log\left(\frac{1}{T}\right)$$

A més, els mateixos autors demostraren (en 1890) que, si es defineix la "exposició" de la placa com l'energia rebuda per unitat de superfície al exposar-la, designant-la E , la relació entre aquesta quantitat i la densitat final en el negatiu correspon a una corba del tipus de la representada en la figura 4-1.

Per a pel·lícules inversibles la morfologia de la corba és similar, canviant solament el pendent de la zona recta, que passa a ser negatiu (fig. 4-3).

En el cas de fotografia en color caldrà precisar altres factors.

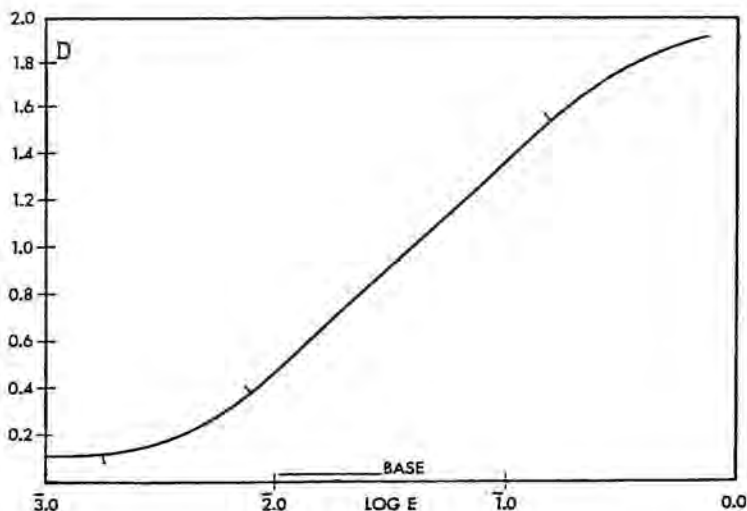


FIGURA 4-1 .- Corba característica (o corba H-D) d'un negatiu fotogràfic.

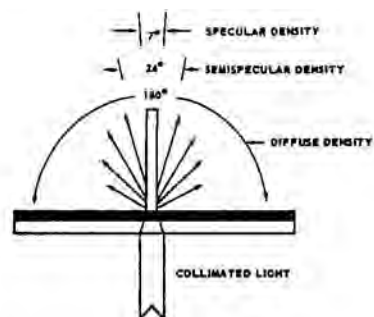
4.1.2. Mesura de la transmitància.

La mesura de transmitàncies en zones microscòpiques de la placa fotogràfica es realitja mitjançant un microdensitòmetre. La descripció i característiques de l'aparell s'analiczen al capítol 6. De moment sols es tracta de fer notar els diferents tipus de densitometria possibles en la pràctica i la relació entre ells.

La transmitància d'una placa fotogràfica s'ha definit simplement com la relació entre la intensitat de llum que travessa la placa i la que incideix sobre ella. Però, donat que la mostra dispersarà la llum, la quantitat d'ella que es mesurarà com a transmesa dependrà de l'angle sòlid que reculli el detector.

Això dóna lloc a diferents definicions de densitat òptica, segons les diferents definicions de transmitància. Es tindrà la densitat especular, la semiespecular o la difosa, segons que el detector de llum transmesa reculli la compresa en una zona de 7° , 24° o 180° , des del punt de la mostra considerat (fig. 4-2)

FIGURA 4-2 .- Llum transmesa detectada segons els diferents tipus de microdensitometria.



Evidentment, la densitat especular és sempre major que la difosa. La diferència entre elles depèn del grau de dispersió lluminosa del material fotogràfic que s'analitza, de manera que es pot definir el factor de qualitat "Q", característic de cada material, de la manera següent

$$Q = \frac{\text{densitat especular}}{\text{densitat difosa}}$$

Sols en el cas de treballar amb mostres de factor Q molt proper a la unitat es podrà parlar de densitat òptica sense ambigüïtat, és a dir, sense haver de precisar si es tracta de l'especular, la semiespecular o la difosa.

Cal fer notar que les dades densitomètriques que proporcionen els catàlegs comercials corresponen sempre a mesures de densitat difosa.

4.1.3. Fotografia en color.

En el cas de la fotografia en color, el "gra" de la pel·lícula, un cop revelada, dóna 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 serà selectiva respecte a la longitud d'ona incident.
- la variació de transparència de la zona serà contínua, per ser deguda a núvols de tinta i no a grans opacs.

- donat que la transparència de les tintes varia amb la longitud d'ona de la llum incident i la dels grans de plata no, sols es podrà parlar, ara, amb precisió de la transmitància d'un punt de la mostra si s'especifica la composició espectral de la font d'il.luminació.

Resumint, es pot caracteritzar la pel.lícula en color mitjançant gràfiques i expressions matemàtiques similars a les de fotografia en blanc i negre, però tenint en compte de realitzar les mesures densitomètriques utilitzant una font de llum de composició espectral determinada i adequada pel cas en estudi.

Quan es tracta de pel.lícula inversible en color, pensada per a ser 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

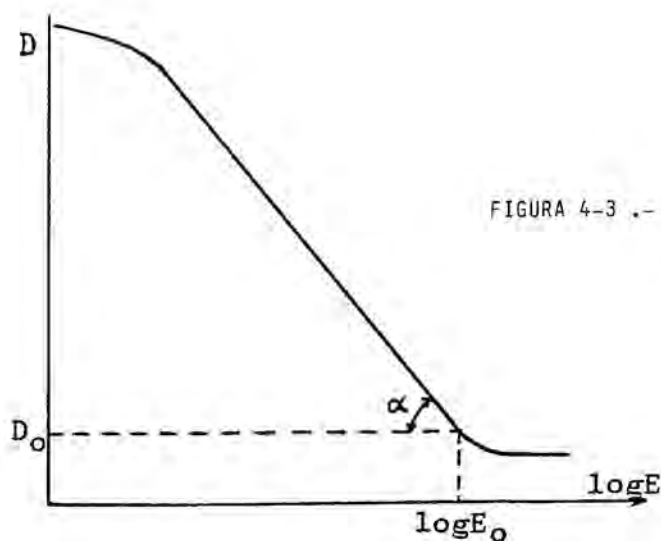


FIGURA 4-3 .- Corba característica d'una pel.lícula inversible.

Per a la zona rectilínia de la corba resulta

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

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 (a mesurar) és la transmitància òptica, d'aquesta manera

$$\log T = \gamma (\log E - \log E_0) - D_0$$

d'on

$$T = \left(\frac{E}{E_0}\right)^\gamma T_0 = k E^\gamma = K I^\gamma$$

sent I la intensitat rebuda per la placa fotogràfica. D'aquesta última expressió es dedueix que la condició de linealitat del sistema òptic (per a aquesta parella entrada-sortida) equival a restringir-se a la zona rectilínia de la pel·lícula inversible i aconseguir un valor de contrast (γ) que $|\gamma|=1$.

4.2. CARACTERITZACIONS MÉS GENERALS PEL PROCÉS FOTOGRAFIC.

En el cas d'un sistema fotogràfic operant amb llum incoherent, sempre que no ens trobem en les condicions d'usar una pel·lícula inversible processada en condicions en que $|\gamma|=1$, no es pot definir directament una funció de transferència, ja que no hi ha una relació lineal entre la entrada i la sortida.

Aquesta dificultat es pot superar separant, del procés fotogràfic total, les fases no lineals que hi intervenen, i considerant sols les altres.

En aquest sentit cal considerar el procés fotogràfic com a successió de dues fases:

- una primera en que la llum incident sobre la placa es difon en la capa sensible, produint una exposició "efectiva" i formant una "imatge latent".
- la segona fase inclou el revelat i la formació de la imatge final.

És evident que la sortida de la primera fase constitueix l'entrada de la segona.

Respecte a la primera fase, no s'ha de confondre l'exposició efectiva amb la que correspondria a la intensitat de llum en un punt de la imatge aèria. L'exposició efectiva és la realment rebuda per l'emulsió fotogràfica. La diferència radica en que entre mig hi ha una difusió de llum que intervé en la producció de l'exposició efectiva. Per a pel·lícules fotogràfiques usuals, de característiques uniformes en tota la zona sensible, el procés de difusió es pot considerar lineal amb suficient aproximació.

En canvi, la segona fase no és lineal. La relació entre l'entrada i la sortida ve expressada per la corba característica de la pel·lícula per al processat adoptat.

Es important assenyalar que, de vegades, s'ignora l'existència de la primera fase, la qual cosa no es pot fer des del punt de vista de l'anàlisi freqüencial, ja que és la responsable de la desaparició de les altes freqüències.

De una manera equivalent, es pot definir l'exposició efectiva de l'emulsió fotogràfica com la que es determina de la densitat de la imatge final mitjançant la corba característica del procés.

Amb tot, la solució no és tan senzilla com podria semblar pel fet de l'existència de microefectes de revelat, entre els que cal destacar l'efecte "d'adjacència". Aquest consisteix en el fet que les característiques de la imatge que es forma en un punt determinat de la placa fotogràfica depenen, a més de la seva exposició efectiva, de l'exposició efectiva dels punts propers.

L'origen físic d'aquest efecte es troba en la fase de revelat, ja que, per exemple, en una zona en la que hi hagi un fort gradient d'exposició, el revelador que actua sobre una de les parts s'esgota molt més que el que actua sobre l'altra. Llavors, la imatge final resultant d'una exposició efectiva en esgraó, per causa de l'efecte d'adjacència, origina un perfil microdensitomètric com el que es representa a la figura 4-4.

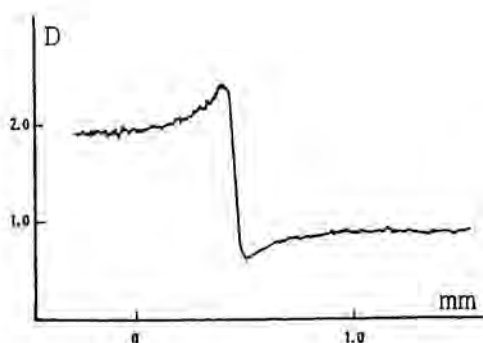


FIGURA 4-4 .- Perfil microdensitomètric de la imatge d'un esgraó en presència de l'efecte d'adjacència.

Ès evident que per a disminuir l'efecte d'adjacència caldrà una bona agitació durant el revelat. Però, en rigor, l'efecte no s'eliminarà mai completament. Això cal considerar-ho com una limitació, que s'haurà de tenir en compte, principalment al tractar amb altes freqüències.

De vegades, per a aplicacions concretes, interessa que es produeixin aquests fenòmens d'adjacència, ja que augmenten el contrast dels contorns. Aquest és el cas, per exemple, en microfilmació.

En conclusió, l'aplicació de l'anàlisi de Fourier a sistemes fotogràfics generals s'ha de restringir al procés de la difusió de llum en la capa sensible del material fotogràfic (formació de la imatge latent), sempre que en el revelat no hi hagi microefectes apreciables.

Es podrà aplicar l'anàlisi de Fourier al procés fotogràfic global en el cas particular de tractar pel·lícula invertible processada de manera que resulti $|\gamma| = 1$, sempre en absència d'efectes d'adjacència.

5.

FUNCIÓ DE TRANSMISSIÓ DE L'ULL I PERCEPCIÓ DEL CONTRAST.

5.1. INTRODUCCIÓ.

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 la conveniència de tenir-lo en compte quan es tracti d'avaluar la qualitat d'imatges observades.

Són molts els aspectes de l'ull i de la visió en general que s'han de tenir en compte per definir les característiques de la visió humana: l'apreciació del color, l'agudesa visual, l'adaptació a la foscor, el mecanisme de la visió estereoscòpica, la persistència de les imatges.

Amb tot, és clar que tots aquests factors no seveixen per definir l'apreciació de qualitat d'una imatge que està observant l'ull, per la qual cosa s'ha de considerar alguna altra caracterització que resulti més adequada.

Si el comportament de l'ull correspongués al d'un sistema lineal invariant, es podria caracteritzar per la seva funció de transferència i considerar-lo, llavors, com un procés més en la cadena dels que intervenen en la obtenció i observació d'una imatge, sent la funció de transferència del conjunt el producte de les dels subsistemes components.

5.2. SISTEMA ÒPTIC DE L'ULL.

L'ull humà pot considerar-se, simplificadament, similar a un sistema de càmera fotogràfica, amb la lent formadora de la imatge i la placa de registre. La lent és el cristal·lí i el seu diafragma d'obertura és l'iris. La placa fotogràfica és la retina.

La part purament òptica del procés de la visió, és a dir, la formació de la imatge sobre la retina per l'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 naturalesa psicofísica, del qual se saben algunes coses, però que no admet una caracterització senzilla i general.

El primer pas, doncs, per a estudiar el comportament de l'ull des del punt de vista de la teoria de sistemes és obtenir la funció de transmissió del seu sistema òptic, o, el que és el mateix, la funció d'extensió de la línia o la funció d'extensió del punt (distribució de llum de la imatge d'una línia o d'un punt ideal sobre la retina).

La funció de transmissió del sistema òptic de l'ull es pot calcular teòricament a partir de les dades geomètriques (distàncies i mesures) i òptiques (índex de refracció) i fent

un model simplificat dels elements constitutius. La medicció experimental es pot fer per coneixement del contrast de la imatge sobre la retina d'un objecte sinusoidal o per transformada de Fourier de la distribució de llum a la imatge d'una línia. Aquestes mesures experimentals, per a qualsevol de les dues possibilitats, es poden realitzar per mètodes directes (observació de la pròpia retina del ser viu) o indirectes (efectuats en retines extretes d'animals) (Ostrovskaya, 1969).

Revisant els mètodes de mesura proposats per investigadors com Flament, DeMott, Röler, etc i comparant els resultats entre si, s'observen notables diferències, sobre tot entre mètodes directes i indirectes.

5.3. ACCIÓ DE LA RETINA.

Respecte a la "visió" de les imatges formades sobre la retina, es pot afirmar que no és un procés lineal ni invariant. La no invariància és evident pel fet que la sensibilitat de la retina no és uniforme sobre tota la seva superfície (fig. 5-2). En aquest punt es trenca l'analogia amb el sistema fotogràfic.

Els elements sensibles a la llum (cons i bastons) estan distribuïts de manera molt desigual sobre la retina, de manera que la sensació de visió depèn de factors tals com el lloc de la retina sobre el que es forma la imatge, el tipus

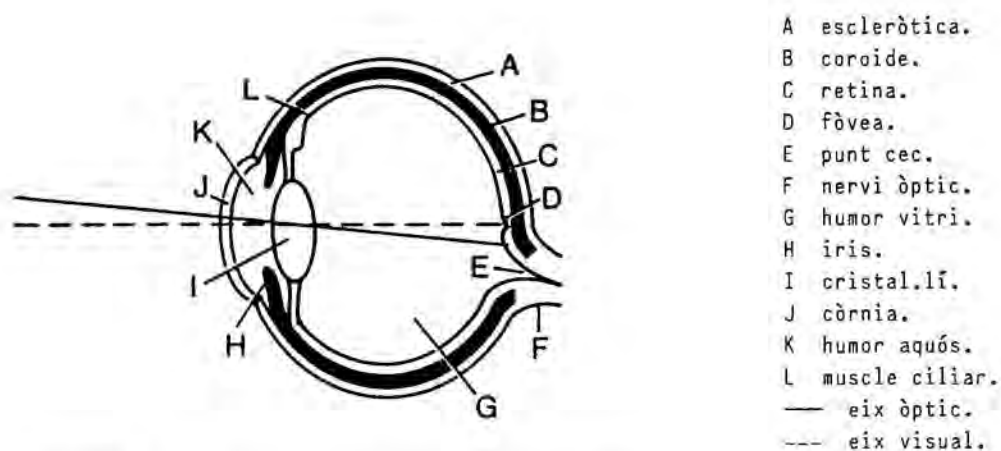


FIGURA 5-1 .- Secció horitzontal de l'ull dret.

de visió (fotòpica o escotòpica), la lluminositat del propi objecte observat, l'estat de fatiga i adaptació de l'ull, etc. És important fer notar que la visió fotòpica és pràcticament foveal i, per tant, deguda quasi exclusivament als cons.

Una descripció útil de l'acció de la retina, vàlida per a la visió fotòpica d'imatges fixes (que és el cas pràctic al que s'aplicarà), és la que es basa en el concepte de "contrast mínim visible", és a dir, el valor mínim del contrast d'un test sinusoïdal (sobre la retina), d'una determinada freqüència espacial, per a que resulti justament visible.

Mesures d'aquest tipus han sigut realitzades per investigadors com Schade, Ooue, Rosenbruch, etc. Una característica important de la visió del contrast per part de la retina és el fet de que el contrast mínim visible augmenta, no sols per a freqüències altes, sinó també per a les baixes (propres a zero).

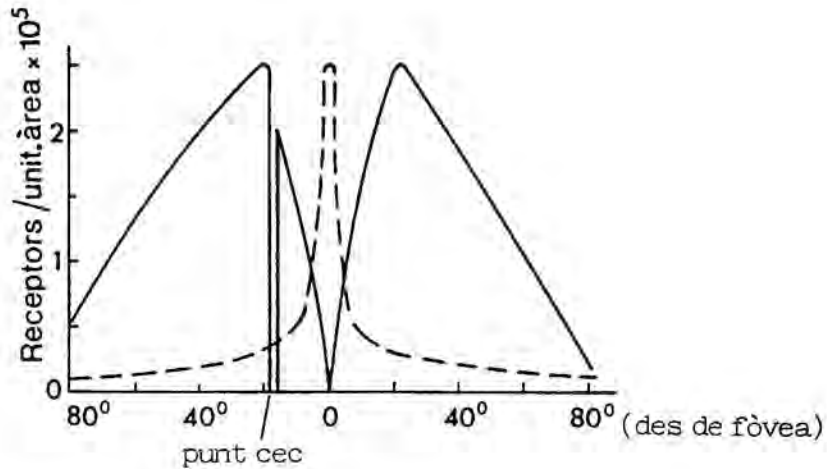


FIGURA 5-2 .- Distribució de receptors en una secció horitzontal de la retina: — bastons, - - cons.

5.4. CARACTERITZACIONS GLOBALES DE LA VISIÓ.

És usual donar caracteritzacions globals del procés de la visió en el llenguatge de la funció de transmissió.

Una possibilitat molt corrent consisteix en fer la suposició bàsica de que el contrast mínim visible de la "imatge final" d'un objecte sinusoidal, c_i , després d'actuar tot el procés de la visió, és constant per a totes les freqüències espaials. Llavors, mesurant el contrast d'un test objecte que resulti justament visible, c_o , (per a una determinada freqüència espacial u) es pot obtenir el mòdul de la funció de transmissió per a la freqüència en qüestió a partir del quocient

$$MFT(u) = \frac{c_i}{c_o}$$

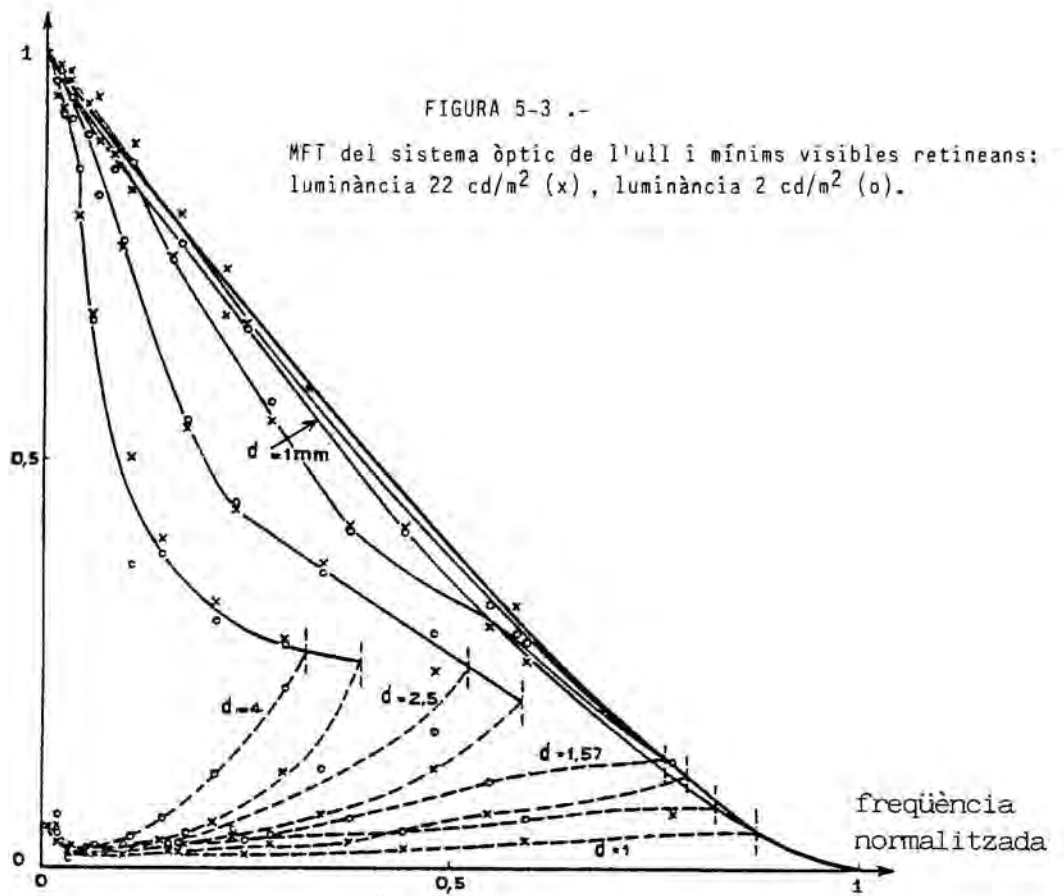
sent c_i el valor constant (en principi desconegut) citat anteriorment.

Amb aquesta suposició, la funció de transferència de l'ull és directament proporcional a $(c_o)^{-1}$. A més, com que resulta que la limitació més gran en la visió en el cas tractat es deguda a l'acció de la retina, se sol dir que, de manera aproximada, la funció de transmissió de l'ull per a una determinada freqüència espacial és proporcional al invers del contrast mínim visible per a la retina en aquella freqüència.

És evident que totes aquestes suposicions són molt fortes i, a més, no precisen les condicions de luminància de la prova, diàmetre de pupil·la de l'ull, etc.

Berger-Lheureux-Robardey presenta un conjunt de resultats, resumits en la figura 5-3, molt adequats per al cas que s'estudia en el present treball. Es donen els valors de la funció de transmissió del sistema òptic de l'ull i els contrastos mínims visibles per la retina sota diferents condicions de luminància de l'objecte i diferents obertures de l'iris. Per ser una caracterització detallada, es pendrà com a base per a la valoració del procés de la visió en l'apreciació de la qualitat de les imatges, havent-se de particularitzar les corbes corresponents a les condicions de treball adoptades (Berger-Lheureux-Robardey, 1965).

Hi ha altres representacions globals més senzilles del procés de la visió. En treballs anteriors del nostre laboratori s'ha considerat com a corba de funció de transmissió de l'ull la representada en la figura 5-4 (Overington, 1973). Es comprovarà més endavant que, si es pren com a funció de trans-



missió de la retina l'invers del contrast mínim visible, amb-
dues representacions pràcticament coincideixen.

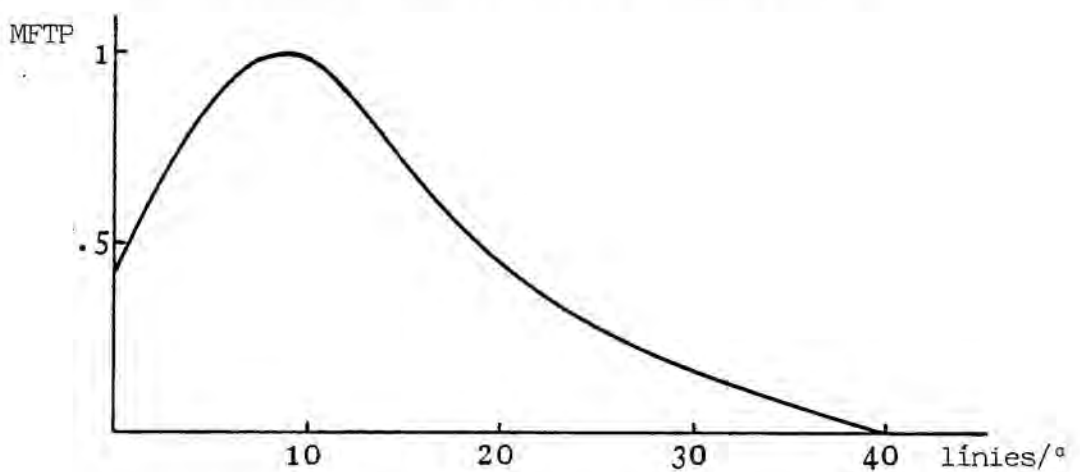


FIGURA 5-4 .- MFTP del sistema visual humà (Overington, 1973).

Això es pot interpretar com que en les nostres condicions de treball es tenien uns valors intermitjos de luminància de l'objecte i d'obertura de l'iris que podien ser semblants als adoptats per a obtenir la corba única de la fig 5-4.

En aquesta comparació quedava clar, també, que hi ha importants objeccions a fer respecte a la identificació entre la funció de transmissió de l'ull i la inversa del contrast mínim visible: al ser aquest molt petit, hi ha molta imprecisió en la determinació del seu invers. Tot això concorda amb el fet de que altres caracteritzacions globals també siguin diferents.

6.

MICRODENSITOMETRIA.

6.1. MICRODENSITÒMETRE.

Un microdensitòmetre és un instrument per a mesurar la densitat òptica d'àrees microscòpiques d'una mostra fotogràfica.

Con que els punts de la mostra queden determinats per dues coordenades espaials, seria desitjable poder determinar les densitats òptiques en àrees microscòpiques a l'entorn de cada punt de la mostra. Un aparell capaç de fer aquestes mesures és molt car de compra o molt difícil de construir.

En el laboratori es disposa d'un microdensitòmetre unidimensional. En aquest cas, l'objecte a analitzar sols haurà de tenir variacions de densitat respecte a una coordenada i caldrà procedir de tal manera que l'àrea microscòpica que s'analitzi sigui rectangular, amb un costat molt estret paral·lel a la direcció de variació de l'objecte. Aquest rectangle no és més que la imatge d'una esclatxa que es forma sobre la mostra en estudi.

L'esquema òptic de l'aparell és el representat a la figura 6-1. S'ha construït en el propi laboratori (Navajas, 1980) adaptant convenientment un xasis de microscopi convencional i afegint-hi components electrònics per a la detecció de llum.

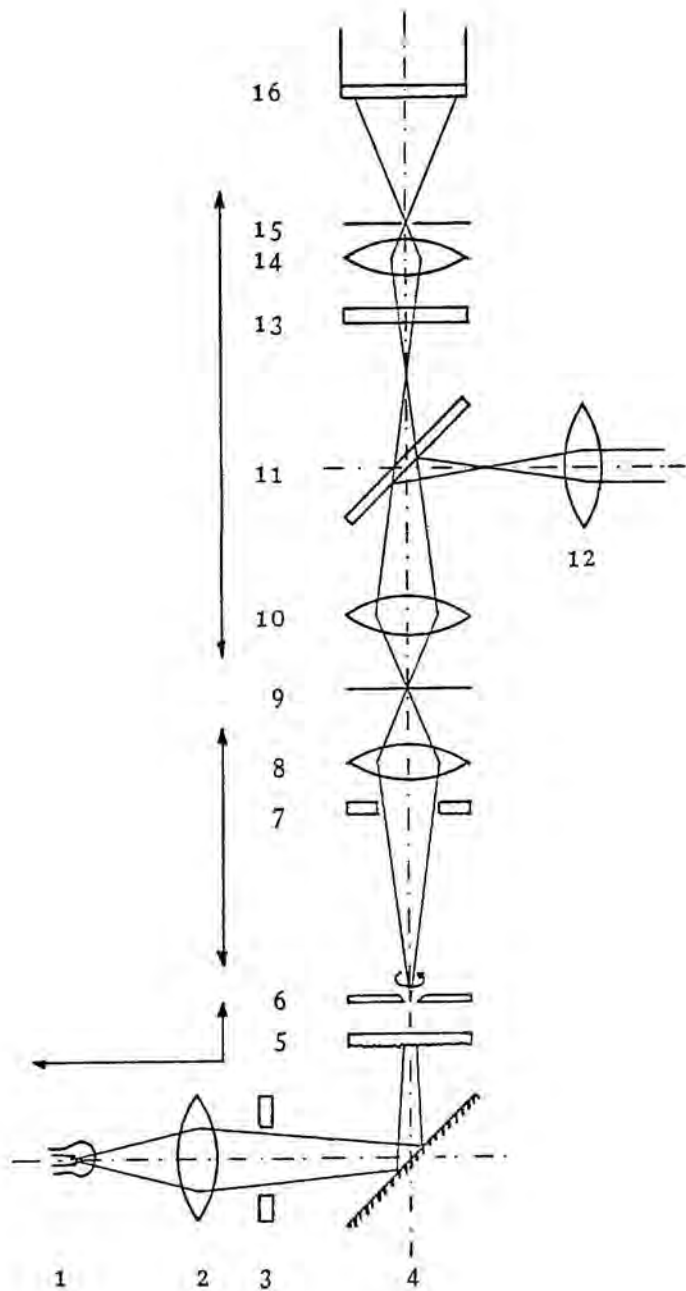


FIGURA 6-1 .- Esquema òptic del microdensitòmetre: 1- Font de llum, 2-Condensador, 3-Diafragma de diàmetre variable, 4-Mirall, 5-Difusor, 6-Escletxa d'escombrada, 7-Diafragma de diàmetre variable, 8-Optica d'entrada, 9-Mostra, 10-Objectiu, 11-Mirall semitransparent, 12-Ocular, 13-Filtres de color, 14-Lent, 15-Diafragma, 16-Fotocàtode.

L'exploració dels successius punts de la mostra es realitza desplaçant-la amb velocitat constant mitjançant un sistema mecànic de precisió adaptat a la platina del microscopi original.

El motor que acciona el sistema mecànic és un motor síncrone tipus Crouzet 82366. La seva velocitat de gir es varia subministrant-li corrent amb un oscil·lador de freqüència adequada a la velocitat desitjada.

La font lluminosa és una bombeta d'incandescència connectada a una font de corrent continu estabilitzat, de manera que es pot variar el voltatge d'alimentació per modificar la composició espectral de la llum subministrada per la bombeta, si cal.

L'òptica d'entrada és un objectiu de microscopi Meopta 10 x N.A. 0,30 i la de sortida un Spencer 10 x N.A. 0,25.

L'esclletxa d'escombrada ha de ser de bona qualitat i no pot ser arbitràriament estreta, per evitar la coherència de la llum que emet. En el present treball s'utilitzarà una esclletxa de $6\ \mu\text{m}$, que és una amplada correcta per a la realització de mesures en el marge de freqüències que es tractarà (Navajas, 1980).

Cal remarcar la importància del sistema ocular (12) per realitzar l'enfoc correcte de la mostra, ja que aquesta operació s'haurà de realitzar sempre visualment i de manera molt precisa.

6.2. SENSIBILITAT ESPECTRAL DEL MICRODENSITÒMETRE.

6.2.1. Necessitats.

Pel present treball interessa disposar d'un detector de resposta espectral corresponent a la de l'ull mitjà humà en visió fotòpica, és a dir, la sensibilitat relativa del detector a la llum de diferents longituds d'ona ha de ser la de l'observador patró en visió fotòpica.

Donat que aquesta característica no correspon a cap dels fotodetectors existents (si funcionen per efecte fotoelèctric sempre hi haurà més sensibilitat per les longituds d'ona curtes), es va adoptar com a element de detecció el fotomultiplicador RCA 6199, de resposta espectral S-11, pel qual la utilització del filtre Kodak nº 106 proporciona, aproximadament, la resposta espectral desitjada. Amb tot, l'aproximació que s'aconsegueix és insuficient i depèn de variacions entre les diferents unitats de fototub.

Per a realitzar la calibració de la resposta del sistema de detecció es necessitava un monocromador d'emissió espectral coneguda (en energia o en potència). En realitat, no és necessari conèixer els valors absoluts emesos, sinó solament les quantitats relatives entre les diferents longituds d'ona. El monocromador utilitzat va ser:

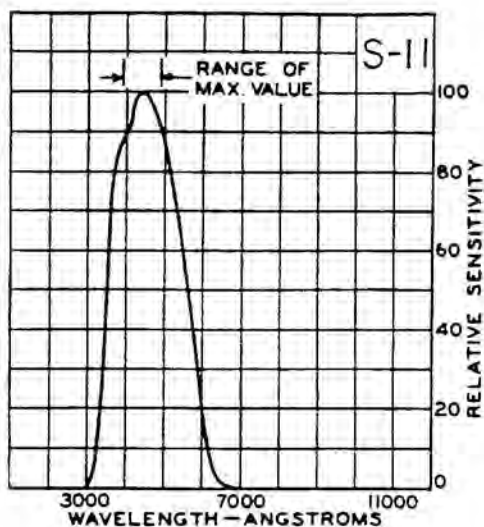


FIGURA 6-2 .- Resposta espectral S-11.

Espectrocolorímetre Spekol (Carlzeiss Jena).

Banda coberta: 360-750 nm.

Semiampлада que proporciona: 11 nm.

Les mesures radiomètriques es van realitzar amb el mesurador de flux Hewlett-Packard Radiant Flux Meter 8330 A i Radiant Flux Detector 8334 A.

La llum subministrada pel monocromador prové d'una bombeta d'incandescència alimentada amb un corrent continu estabilitzat de 6 V. En conseqüència, la distribució espectral d'aquesta llum no és pas uniforme per a totes les longituds d'ona:

El mesurador de flux dóna els $\text{Watt} / \text{cm}^2$ que arriben a la seva superfície sensible. Per tant, si no es canvien les posicions relatives entre la font emissora (monocromador) i el detector de flux, les lectures d'aquest donaran directament la distribució relativa de les intensitats emeses pel monocromador.

Malgrat tot, aquesta mesura directa no és suficientment precisa pel fet que s'ha de realitzar en l'escala més sensible de l'aparell del que es disposa. A més, les característiques del sistema de detecció (termopila), afegixen derives temporals a les mesures degudes a microfluctuacions de temperatura.

Un mètode molt senzill de millora és, simplement, concentrar a la zona sensible del detector la més gran quantitat de llum possible de l'emesa pel monocromador, cuidant de mantenir l'estructura geomètrica al canviar de longitud d'ona per a que sempre es mesuri el mateix feix emergent.

Primer això es va fer amb una lent convergent, però aviat es va deduir que així no hi ha garanties de manteniment de la geometria del muntatge, ja que, encara que la lent no es mou físicament, l'aberració cromàtica pot tenir un efecte equivalent.

Per això es va adoptar, finalment, un mirall concau com a focalitzador, assegurant així el manteniment de la disposició geomètrica del conjunt emissor-receptor.

En la figura 6-3 es presenten els resultats de la calibració pels tres mètodes. Es van considerar definitius els corresponents a les dades obtingudes utilitzant el mirall.

És interessant comparar aquesta corba amb la d'emissió del cos negre a la temperatura que es dedueix de la llei de Wien. Resulta, d'aquesta llei, $T = 4636$ K. Si es calcula la

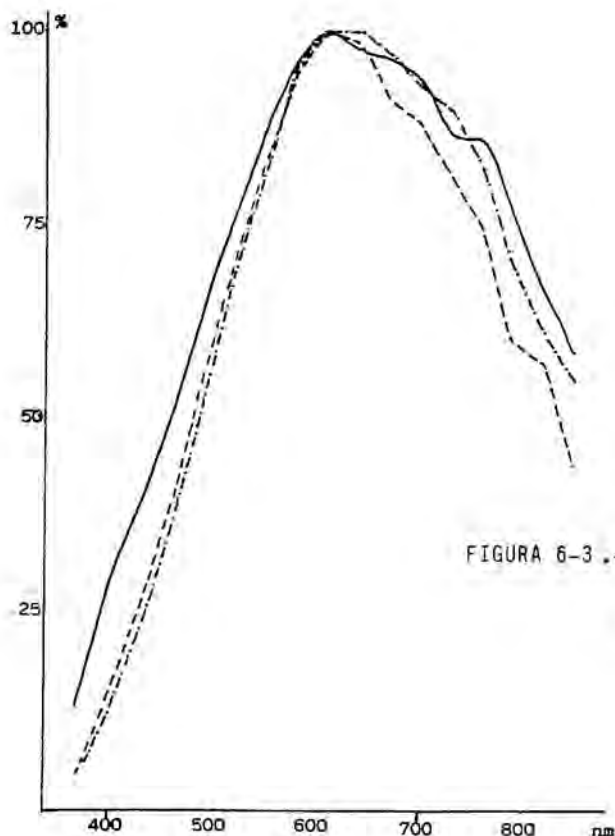


FIGURA 6-3.- Energies espectrals relatives subministrades pel monocromador Spekoi: — mesura directa.
 --- amb lent auxiliar.
 -+- amb mirall auxiliar.

corba d'emissió del cos negre per a aquesta temperatura, es troba una gran concordància amb l'emissió de la bombeta.

6.2.2. Calibració del microdensitòmetre.

Si ja es disposa d'una font de llum monocromàtica calibrada, es pot utilitzar en substitució de la bombeta d'il·luminació del microdensitòmetre, de manera que, sols mesurant la sortida de l'aparell en relació a l'entrada corresponent, es tindrà la resposta espectral del microdensitòmetre.

De manera resumida, es pot dir que el sistema de detecció del microdensitòmetre consta d'un fotomultiplicador sensible a la potència lluminosa que arriba al seu càtode, sempre

que correspongui a un cert interval de longituds d'ona, produïnt un cert corrent d'anode. Aquest constitueix l'entrada d'un amplificador que el converteix en una diferència de potencial. En el nostre cas concret, aquesta diferència de potencial de variació contínua s'enregistra digitalment mitjançant un multicanal Hewlett-Packard 5480 A/B, la qual cosa permet visualitzar simultàniament la medició a través de la pantalla de "display" de que disposa.

D'aquesta manera, el més convenient és una calibració conjunta de tot aquest sistema de detecció. És a dir, com que la diferència de potencial que arriba al multicanal constitueix la sortida final, caldrà determinar la corba de variació

Volts lectura / energia entrada en el microdensitòmetre

i ha de ser la corba d'aquesta corba la que s'ha de portar a coincidència amb la de la resposta espectral de l'ull en visió fotòpica.

Com que hi ha un petit "dark current", és a dir, un petit corrent d'ànode sense que arribi llum al càtode, les mesures es realitzen fent correspondre 0V a la sortida quan no arriba llum al microdensitòmetre.

Per a tot això, cal fixar prèviament les condicions de treball de tots els components del microdensitòmetre. Per exemple, la font d'alta tensió estabilitzada a la que es connecta el fototub, ha de tenir un període d'escalfament previ al d'utilització de 30 minuts, per assegurar que no presenta

microderivives en la tensió que subministra. D'altra banda, la tensió de treball del fototub pot arribar fins els 1200 V, però, en el nostre cas, s'ha utilitzat sempre un voltatge de 1000 V. També es va establir un període d'escalfament general de l'aparell d'uns 10 minuts, mantenint la temperatura ambient en un marge de $\pm 2^\circ$ a l'entorn de 18 C.

Es va fer una primera determinació de la resposta del microdensitòmetre sense cap filtre de color, de manera que, a partir d'aquestes dades ja era calculable el filtre teòric necessari per adaptar la resposta a la desitjada (observador patró en visió fotòpica).

Donat que no es pot disposar d'un filtre de color amb la transmitància adequada per a les necessitats del cas, sinó que cal utilitzar els existents en el mercat, es va haver de desenvolupar un petit programa d'ordinador que calcula la resposta modificada del sistema de mesura al introduir un determinat conjunt de filtres en el microdensitòmetre.

A partir de les dades contingudes en el catàleg de filtres Kodak, i després de moltes proves, es va arribar a una combinació de filtres senzilla (pocs elements constituents) i que havien de donar una resposta prou acurada. Es va comprovar que la predicció teòrica es corresponia amb el resultat experimental (fig. 6-4) i es va adoptar, finalment, el conjunt de filtres:

Kodak n° 106

Kodak n° 85 C

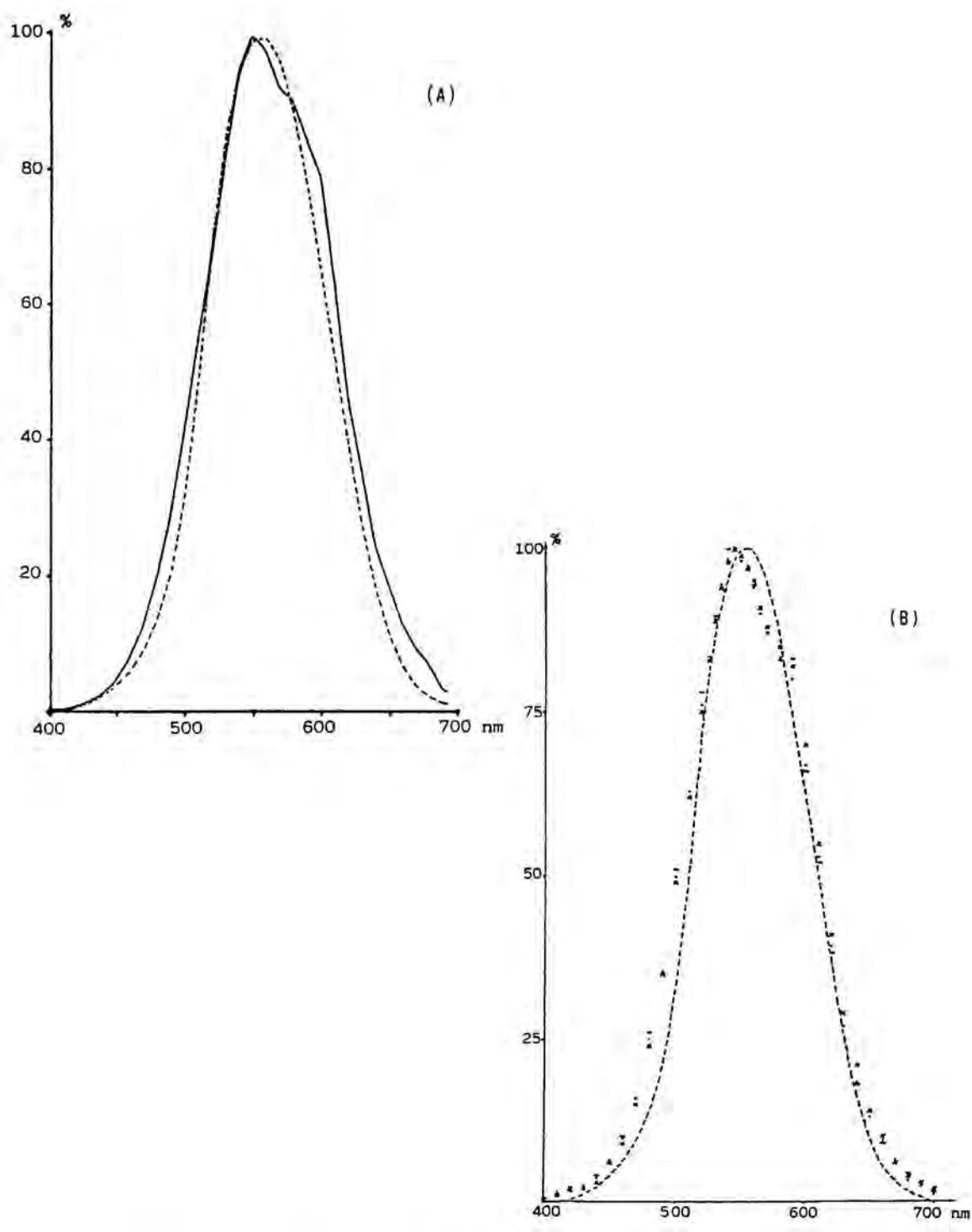


FIGURA 6-4 .- Predicció teòrica (A) i ajust experimental aconseguit (B) de la resposta espectral del microdensitòmetre. (--- sensibilitat de l'ull humà en visió fotòpica).

Aquests resultats experimentals es podrien ajustar millor afegint filtres grocs i cyan, però, per a tenir més llum, no es va fer.

Totes les determinacions es van realitzar per a uns valors de corrent anòdic màxim semblants als d'utilització pràctica posterior: $1 \mu\text{A}$.

La sensibilitat fotomètrica del fototub varia de manera notable durant la seva vida útil. Això és un inconvenient per a la comparació de mesures corresponents a diferents èpoques (gran interval de temps entre elles), però no és obstacle per un curt període després de la calibració. En el present treball, es va substituir el fototub del que disposava el microdensitòmetre i que s'havia usat durant molt temps, per una nova unitat del mateix tipus que es va calibrar segons el mètode explicat.

6.3. LINEALITAT DEL MICRODENSITÒMETRE.

L'adequada significació física de les mesures realitzades amb un microdensitòmetre exigeix, necessàriament, la linealitat de l'aparell. Sols així serà definible la funció de transferència del sistema de mesura com la transformada de Fourier de l'esclatxa d'escombrada que es forma sobre la mostra a analitzar.

Efectivament, es pot suposar que es verifica la condició

d'invariància pel fet d'utilitzar bones lents i analitzar solament àrees petites prop de l'eix òptic del microscopi que constitueix la base del microdensitòmetre. Llavors sols cal exigir linealitat al sistema per a estar en condicions de definir la seva funció de transmissió.

Se sap que una condició necessària per a que el microdensitòmetre operi linealment és que la il.luminació de l'esclatxa d'escombrada sigui incoherent, el qual porta a imposar

$$N.A.(\text{òptica d'entrada}) / N.A.(\text{òptica de sortida}) > 1$$

(Kinzly, 1972).

Com que aquesta condició necessària ja s'ha tingut en compte, es pot comprovar directament la linealitat del sistema de mesura de manera pràctica pel marge de freqüències d'interès.

Aquesta comprovació s'havia realitzat per a amplades de l'esclatxa d'escombrada fins a un valor mínim de $5\ \mu\text{m}$ (Navajas, 1980). En el present treball es va operar sempre amb una amplada de $6\ \mu\text{m}$. Per tant, es pot concloure que la funció de transmissió del sistema de mesura ve donada per la transformada de Fourier de la seva esclatxa d'escombrada. En la figura 6-5 es representa aquesta funció de transmissió per a algunes amplades d'esclatxa.

Amb tot, es va realitzar una prova per avaluar conjuntament tot el sistema pràctic de mesura en la banda de freqüències des de 0 fins a 70 línies per milímetre.

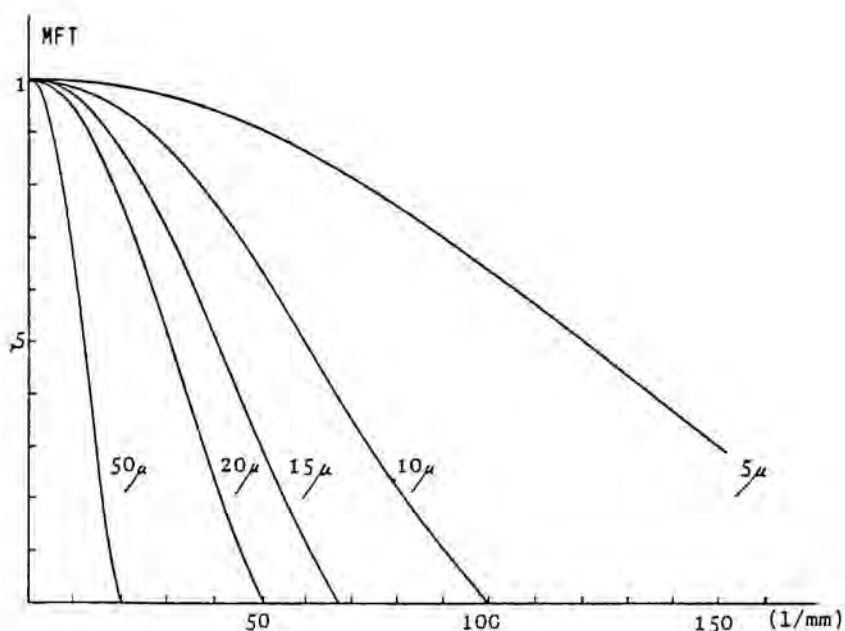


FIGURA 6-5 .- Funció de transmissió del microdensitòmetre per a diferents amplades d'esclatxa d'escombrada.

La prova consisteix en analitzar una esclatxa d'amplada $10 \mu\text{m}$. En aquest cas, al ser la mostra considerada la pròpia imatge ideal, la funció de transmissió amb la que ha actuat el sistema "formador de la imatge" és de mòdul 1 per a totes les freqüències. Per tant, tenint en compte la funció de transferència de l'aparell de mesura, l'aproximació del valor del MFTP calculat amb el valor 1 esperat dona idea de la correcció del mètode de mesura en conjunt.

6.4. UTILITZACIÓ PRÀCTICA DEL MICRODENSITÒMETRE.

La necessitat de tenir mesures fiables fins a freqüències relativament altes (70 l/mm) porta a fer convenient una revisió de tots els factors que intervenen en elles, valorant la seva importància relativa en el resultat final.

És evident que una "bona mesura" es caracteritzarà pel compliment de dues condicions independents i igualment necessàries:

- i) el procés pràctic ha de ser el que correspon correctament al model teòric inherent.
- ii) el procés pràctic ha de ser repetitiu.

6.4.1. Compliment de les condicions teòriques de mesura.

A més del que s'ha comentat sobre la resposta espectral del microdensitòmetre, hi ha altres factors que es poden modificar d'unes mesures a les altres i que intervenen de manera important en el resultat final.

Per exemple, tant l'amplificador de corrent anòdic com el multicanal tenen moltes escales de treball. Es va comprovar que resultaven equivalents, però, a més, es van fixar les d'utilització a les mesures definitives per a que totes es realitzessin en les mateixes condicions. Hi ha altres factors que no intervenen tan trivialment.

Una comprovació important és la de la velocitat a la que es mou la mostra sobre la platina del microdensitòmetre, d'acord amb la freqüència d'alimentació del motor síncrone. Cal que aquesta velocitat sigui constant i ben coneguda, ja que intervé directament en la determinació de l'interval de digitalització de la mostra que s'analitza.

En aquest punt cal examinar com es realitza aquesta digitalització. El senyal continu que arriba al multicanal procedent del fototub es mostrejat a intervals regulars de temps. Per tant, si la mostra es mou a velocitat constant i coneguda, les lectures del multicanal correspondran a intervals regulars i coneguts de la mostra.

Si la velocitat de desplaçament de la mostra es designa v , resulta ser

$$v = (0,00298 + 0,00002) * F \text{ mm / s}$$

sent F la freqüència de treball del motor síncrone, expressada en Hz.

Per altra part, el ritme de mostreig de dades (S) efectuat pel multicanal ("sweep time") s'expressa en número de segons necessari per a omplir 1 cm de la seva pantalla "display". A més, aquesta pantalla, de llargada 10 cm, es pot utilitzar contenint un total de 250, 500 o 1000 valors (NPP).

Així, l'interval de digitalització de la mostra es calculara mitjançant la següent fórmula

$$\frac{v \text{ (mm/s)} * S \text{ (s/cm)}}{\text{NPP (punts)} / 10 \text{ (cm)}}$$

on el resultat queda expressat en milímetres.

Resumint, si es coneix la freqüència d'alimentació del motor que desplaça la mostra (F), el ritme de mostreig (S) i el nombre de punts en pantalla del multicanal (NPP), l'interval de digitalització en milímetres és

$$\underline{S * 0,0298 * F}$$

NPP

Ja s'ha discutit, per altra part, la necessitat de que la il.luminació de l'esclatxa del microdensitòmetre sigui estable i de composició espectral correcta.

L'amplada d'aquesta esclatxa d'escombrada ha de ser, també, ben determinada. La manera de fer aquesta determinació va ser: posar en el lloc destinat a la mostra (en el microdensitòmetre) un reticle de precisió Graticules Ltd., amb divisions cada $2\mu\text{m}$, de manera que la imatge de l'esclatxa es forma sobre el propi reticle en les mateixes condicions que per a una mesura pràctica.

6.4.2. Repetibilitat.

Hi ha dos factors, previs a qualsevol mesura, que cal considerar:

- i) sentit de col.locació de la mostra en el microdensitòmetre.
- ii) enfoc de l'esclatxa d'escombrada sobre la mostra.

Respecte al primer factor, resulta evident que les dues possibilitats (emulsió o base plàstica de la mostra rebent directament la llum) difereixen en un fet fonamental: en un cas l'esclatxa d'escombrada s'enfoca sobre el gra de l'emulsió abans de que la llum travessi la base plàstica i en l'altre després, el que resultarà ser molt important.

Si es considera com a model senzill de la pel.lícula fotogràfica impressionada i revelada una làmina plàstica de cares plano-paraleles a la que es superposa una zona impressionada de característiques rugoses o no uniformes, resulta clar que si la base rep directament la llum incident, la imatge de l'esclletxa que es formarà sobre la part impressionada no serà nítida. L'efecte és similar a realitzar una exposició fotogràfica amb la pel.lícula col.locada en sentit contrari al habitual.

Amb això, sembla tenir més sentit realitzar les mesures densitomètriques rebent la llum durant l'escombrada pel costat impressionat de la mostra fotogràfica, al mateix temps que cal esperar resultats numèrics més alts pels valors de les funcions de transmissió que es calculin. Aquesta afirmació quedarà ampliament demostrada.

Respecte a la influència de l'enfoc de l'esclletxa d'escombrada sobre la mostra que s'analitza, s'ha de tenir en compte que sempre serà l'ull, en darrer terme, qui jutjarà les condicions d'enfoc. Per tant, caldrà minimitzar les influències derivades del caràcter subjectiu de les observacions visuals, fent que l'ull realitzi les funcions que li són més pròpies.

Es comprova immediatament que l'enfoc de l'esclletxa d'escombrada sobre la part impressionada de la mostra és un factor crític pel resultat de les mesures.

En les condicions normals d'utilització del microdensitòmetre s'ha de tenir en compte que la mida de l'esclatxa d'escombrada sobre la mostra és de $6\ \mu\text{m}$, amb el que la mida aparent en observar-la per l'ocular serà

$$6\ \text{m} \times 10\ (\text{augment obj.}) \times \text{augment ocular}$$

Llavors, serà necessari enfocar l'esclatxa sobre la mostra amb precisió superior al propi gruix del gra de la pel·lícula. A més, al analitzar mostres unidimensionals, cal aconseguir perpendicularitat total entre l'esclatxa d'escombrada i la direcció de variació de la mostra. Tots aquests passos s'han de fer per apreciació visual, sent impossible la seva automatització. Per altra part, sinó queda garantit el compliment d'aquestes condicions, caldrà dubtar de la possibilitat de mesurar la funció de transmissió per a freqüències relativament altes.

Donada l'importància d'aquesta part del treball, es va estudiar molt detingudament la seva resolució, arribant-se, finalment, a un procés de treball molt satisfactori.

La base del mètode és el fet d'aprofitar el que l'objectiu de microscopi que recull la llum que travessa la mostra va muntat sobre el "revòlver" d'objectius del microscopi original.

Llavors el que es fa és utilitzar un objectiu de microscopi de 45 x per a realitzar els enfocs necessaris, tornant a posar, per a realitzar la mesura, l'objectiu correcte, des-

plaçant-lo sobre l'eix òptic la distància necessària per a que aquest nou objectiu quedi enfocat correctament. Aquest desplaçament serà sempre el mateix per a un determinat parell d'objectius utilitzats.

Com que el mecanisme d'enfoc que té el xasis de microscopi sobre el que s'ha muntat el microdensitòmetre posseeix un pas micromètric de 0,1 mm pe volta, adaptant-li un sector circular graduat i cuidant de fer les determinacions amb l'ull sense acomodació, es va aconseguir una precisió en la profunditat d'enfoc d'un 0,04 voltes, o sigui 4 μ m, utilitzant l'objectiu auxiliar de 45 x.

Així doncs, col.locada la mostra i observada amb l'objectiu de 45 x, s'enfoca el gra de la pel.lícula (en realitat una determinada profunditat del gra). Llavors s'enfoca el condensador del microscopi (òptica d'entrada del microdensitòmetre) de manera que la imatge de l'esclatxa s'observi nítida i ben orientada respecte a la mostra. Si ja no es desplaça verticalment ni la mostra ni el condensador, queda garantit l'enfoc correcte de l'esclatxa sobre la mostra en tot el procés posterior.

Llavors es col.loca l'objectiu adequat per a l'escombrada i, abans de realitzar-la, es separa 3/4 de volta (0,075 mm) de la mostra. Aquesta és la distància necessària per a que, amb el nou objectiu, la mostra quedi correctament enfocada.

Es va comprovar que resulta molt crítica la posició del

condensador respecte a la mostra, és a dir, l'enfoc de l'esclatxa sobre ella: un desplaçament de 1/4 de volta del micromètric per damunt o per sota de l'enfoc correcte (inapreciable si s'observa amb un objectiu de 10 x), porta a resultats molt diferents. En canvi, es va comprovar que no resulta gens crítica la posició de l'òptica de sortida respecte la mostra.

En conclusió, aquest mètode de mesura proporciona la precisió necessària per a la realització de les mesures, en contraposició a l'ús d'un únic objectiu de 10 x, inadequat per aconseguir bones apreciacions visuals.

Amb tot això es va establir un mètode de mesura de 12 passos, que s'exposa a continuació. Amb les modificacions necessàries per les diferents característiques concretes d'altres microdensitòmetres, es proposa aquest mètode com a base per una mesura precisa i significativa.

PROCÈS DE MESURA

- 1) Col·locar la mostra sobre la platina amb el costat de l'emulsió rebent la llum de l'esclatxa.
- 2) Ajustar el voltatge de la font d'alimentació de la bomba beta del microdensitòmetre a un valor intermig (per a no ser enlluernat).
- 3) Sense esclatxa en el microdensitòmetre i amb l'objectiu d'escombrada, centrar la mostra fins a aconseguir una de les disposicions (segons es miri esclatxa o test):



(l'ocular té un reticle de creu que és molt útil)

NO TOCAR MÉS LA MOSTRA.

- 4) Posar l'objectiu de 45 augments.
- 5) Enfocar el gra de l'emulsió, conjuntament amb el reticle de l'ocular (amb l'ull sense acomodar).
- 6) Col·locar l'esclatxa d'escombrada paral·lela al braç vertical del reticle i enfocar-la juntament amb la mostra de manera que quedi al mig d'aquesta mostra.
NO VARIAR L'ENFOC DE L'ESCLATXA D'ESCOMBRADA.
- 7) Col·locar l'objectiu normal i separar-lo de la mostra 3/4 de volta de l'ajust micromètric.
NO MODIFICAR L'ENFOC DE L'OBJECTIU.
- 8) Desplaçar la mostra cap un costat per a fer l'escombrada cap a l'altre.
- 9) Ajustar el voltatge de la bombeta del microdensitòmetre.
- 10) Tapar el microdensitòmetre per evitar llum paràsita.
- 11) Fer l'escombrada.
- 12) Tornar a col·locar l'objectiu 45 x i comprovar l'enfoc.

7.

CRITERIS DE QUALITAT D'IMATGE BASATS EN EL MFTP.

7.1. CRITERIS DE QUALITAT CLASSICS.

Abans d'analitzar els criteris de qualitat d'imatge basats en el MFTP, s'examinaran dos dels criteris convencionals relacionant-los amb la funció de transmissió.

7.1.1. Imatge d'un estel.

Aquest és un mètode introduït pels astrònoms per provar els telescopis. Consisteix en analitzar la imatge d'una estrella, realització física del punt objecte ideal. Llavors es tractarà de relacionar l'aspecte de la imatge formada pel sistema òptic amb el disc d'Airy ideal que es produiria per un sistema perfecte limitat per difracció. El mètode es pot realitzar visualment o recollint les imatges fotogràficament. La realització del test en el laboratori es pot fer utilitzant un diafragma puntual situat en el focus d'una lent colimadora de bona qualitat.

A la figura 7-1 es representa el muntatge:

S font de llum.

C condensador.

F filtre de color.

P diafragma puntual.

K colimador.

D diafragma o diafragmes.

L lent que s'està avaluant.

M microscopi per a fer les observacions.

R és el suport nodal, sobre el que es munta la lent a estudiar de manera que pugui girar a l'entorn d'un eix vertical que passa pel punt nodal imatge de la lent (N_2). Amb aquesta rotació no hi ha canvi en la posició de la imatge, però es consegueix explorar la zona de camp que interressi. El microscopi (M) ha d'estar muntat sobre un suport micromètric.

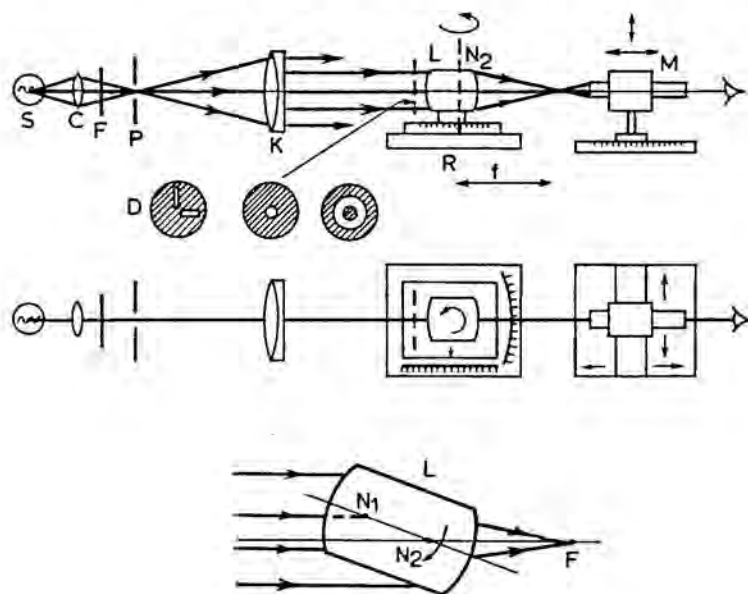


FIGURA 7-1 .- Muntatge experimental per a la realització del test d'anàlisi de la imatge d'un estel.

El procediment de prova consisteix, primerament, en determinar la focal f . Amb la utilització de filtres de color (F) es podran determinar els valors de l'aberració cromàtica. Amb diafragmes anulars (D) es calcularà l'esfèrica i amb altres diafragmes l'astigmatisme, etc.

Si les determinacions es fan registrant fotogràficament les imatges, es tindrà un test de qualitat pel sistema conjunt.

7.1.2. Test de resolució.

Un mètode molt senzill per avaluar un sistema òptic és el d'observar la imatge que dona d'un test de resolució. En alguns camps d'aplicació concrets com la fotografia aèria o la microfilmació, aquest tipus de test pot ser, inclús, el més convenient.

Hi ha gran varietat de tests de resolució, però bàsicament tots consisteixen en sèries de barres de diferent separació o freqüència espacial (Artishevskii, 1975). Com exemple típic es pot considerar el test USAF, que consta de sèries de tres barres d'igual amplada ($d/2$) repetides per parelles col·locades en angle recte i disposades en espiral de manera que la freqüència augmenta cap a l'interior en una relació constant. Una barra (B) i el seu espai adjacent d'igual amplada (S), constitueixen una "línia". L'invers del valor de la línia és la "freqüència espacial" de la sèrie corresponent. Una barra de 0,1 mm d'amplada correspon, per exemple, a una freqüència de 5 l/mm. Si el test es fotografies reduint-lo 20 vegades, la corresponent freqüència espacial en la imatge serà 100 l/mm. També és important el valor del contrast del test, és a dir, la relació entre la reflectància o transmissió de la barra i de l'espai adjacent. En general s'utilitzen tests d'alt contrast, però, de vegades, un de baix contrast es pot adequar millor a la utilització posterior del sistema que s'analitza. Si es vol una avaluació simultània de tot el camp, pot realitzar-se una disposició pràctica

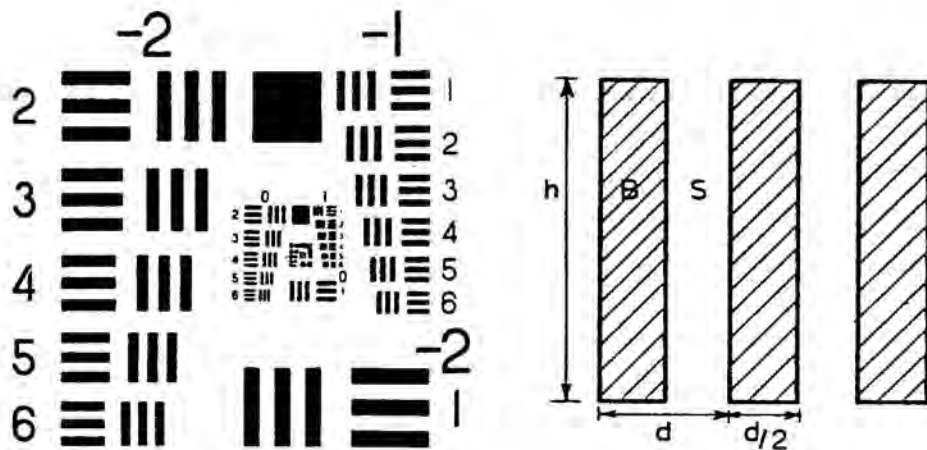


FIGURA 7-2 .- Test de resolució USAF. Detall d'una sèrie.

com la que es mostra a la figura 7-3.

El mètode és senzill, ràpid i pot ser molt útil si es tracta d'avaluar un sistema concret per a una aplicació determinada. Les limitacions del mètode són moltes. La principal és el fet de que, simplement, una millor resolució no implica una millor imatge. Per altra part, la resolució dependrà del contrast de l'objecte. Si l'observació és visual s'hi afegirà, a més, la subjectivitat de l'apreciació. Cal considerar, doncs, el test de resolució com un mètode simple però d'aplicació limitada.

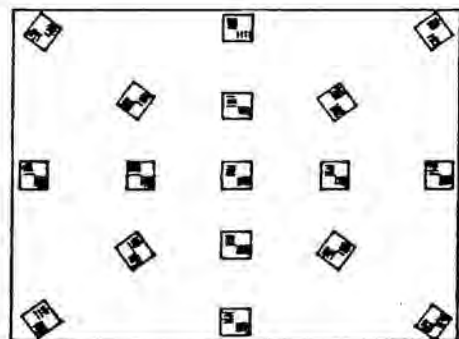


FIGURA 7-3.- Disposició dels tests per a l'estudi simultani de tot el camp objecte.

Tambés s'han desenvolupat tests de resolució específics per a sistemes de projecció, per televisió, etc, seguint les recomanacions de laboratoris i organismes internacionals (BS, ANSI, DIN, etc).

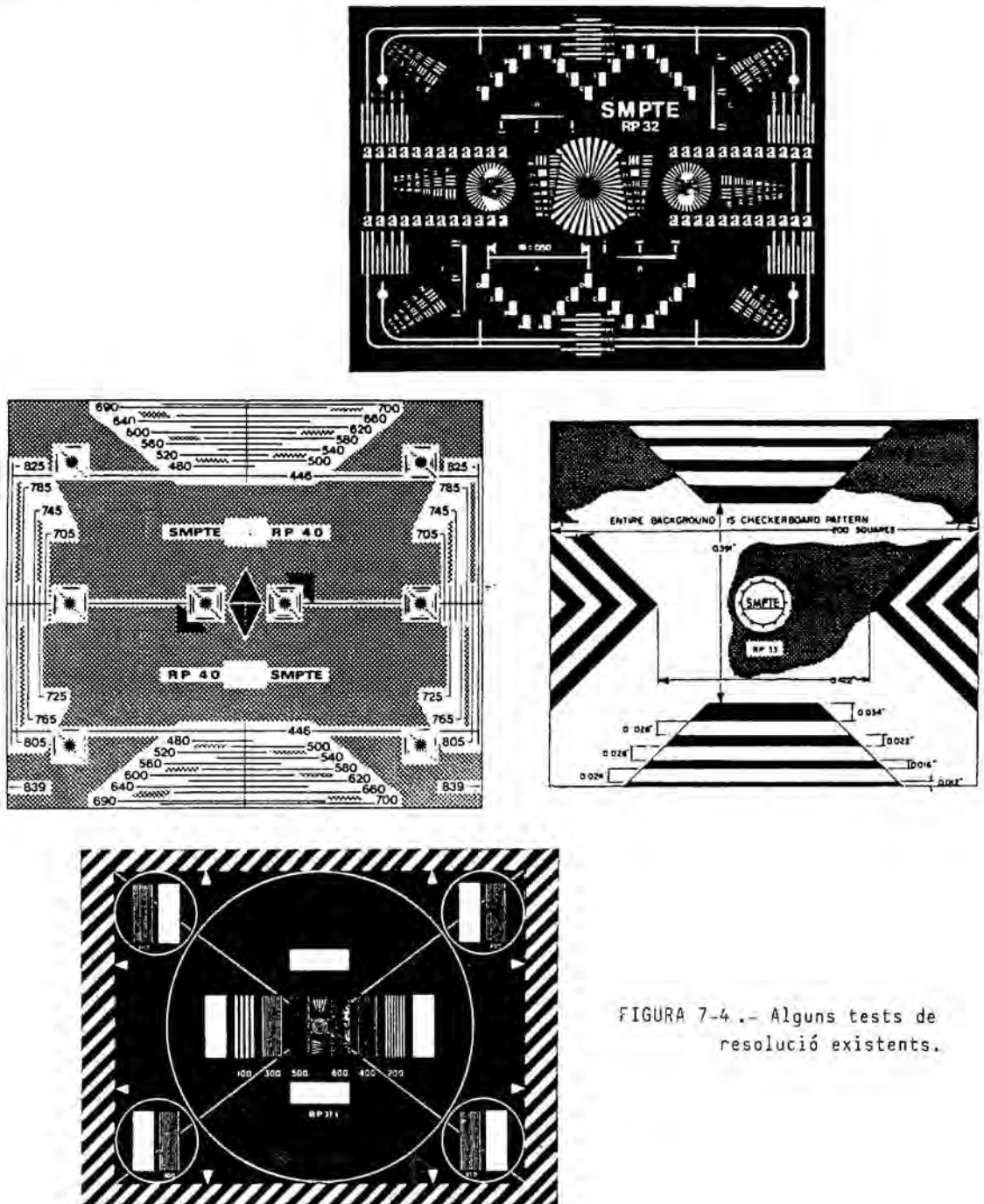


FIGURA 7-4.- Alguns tests de resolució existents.

7.1.3. Conclusions.

Si recapitulem les característiques d'ambdós mètodes d'avaluació analitzats, és clar que el test de la imatge de l'estel és molt complet i significatiu, però difícil de realitzar pràcticament i generant una quantitat d'informació excessiva i redundat. Contràriament, el test de resolució és ràpid i senzill, però, pel mateix motiu, resulta moltes vegades insuficient.

Considerant els dos mètodes des del punt de vista de la funció de transmissió, es veu que corresponen, respectivament, a l'estudi de la funció d'extensió del punt i al càlcul de la freqüència espacial per a la qual el MFT davalla fins a un valor determinat. És a dir, en el marc de la teoria de la funció de transferència, els dos tests hi queden inclosos: el de la imatge de l'estel és pràcticament equivalent a la pròpia funció de transferència, encara que la informació es presenta de manera molt dispersa; el test de resolució sols té en compte un aspecte molt particular de la teoria de la funció de transferència.

7.2. CRITERIS DE QUALITAT BASATS EN EL MFTP.

7.2.1. Revisió bibliogràfica.

Els criteris de qualitat d'imatge proposats i utilitzats per diversos investigadors en diferents camps són molts i de

diferent tipus. Els més senzills venen donats per un sol valor, obtingut d'una única determinació: poder resolutiu, valor del MFT per a una determinada freqüència, etc. Els criteris més elaborats provenen, en canvi, de la determinació prèvia de la funció de transmissió del sistema considerat.

Una conclusió general de al utilització de criteris de qualitat basats en el MFT és que solen funcionar satisfactòriament quan es comparen corbes de funció de transmissió de la mateixa morfologia: si un sistema treballa sempre amb valors de la funció de transmissió més alts que un altre, no hi ha dubte de que la seva qualitat serà millor. Les divergències sorgeixen quan les corbes de la funció de transmissió es tallen entre elles.

A continuació es recullen alguns criteris de qualitat recents, aplicats en diferents camps d'utilització.

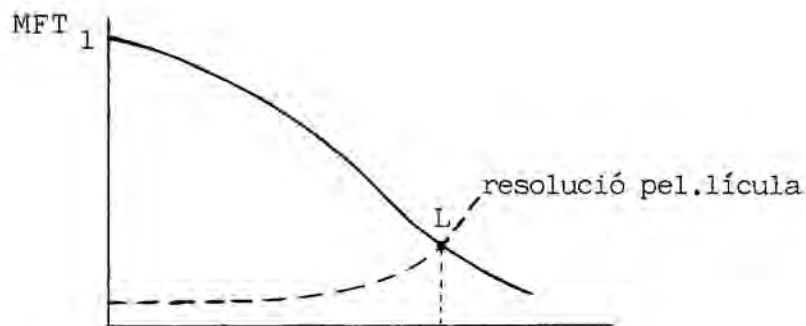
Dutton fa una recopilació de criteris de qualitat d'aplicació més o menys general:

- integral de la funció de transmissió estesa a totes les freqüències.
- valor del MFT per a una freqüència prefixada.
- mitjana dels valors de les àrees sota al corba de la funció de transmissió per a tot el camp d'utilització de l'instrument.
- àrea sota el MFT mínima per a tot el camp.
- valor de la resolució fotogràfica en les condicions de treball (Dutton, 1972).

Artishevskii proposa com a criteri de qualitat en sistemes fotogràfics, el valor de la freqüència espacial per a la qual el MFT del sistema es fa menor que 0,1, valor que es considera mínim per a resultar apreciable (Artishevskii, 1975).

En el camp de la fotografia aèria, Marchant proposa com a criteris d'avaluació de lents el següents:

- freqüència espacial per a la que el MFT de la lent es fa menor que un valor prefixat.
- valor del MFT per a una freqüència espacial determinada.
- àrea delimitada per les corbes de MFT de la lent i de resolució de la pel·lícula fotogràfica emprada.



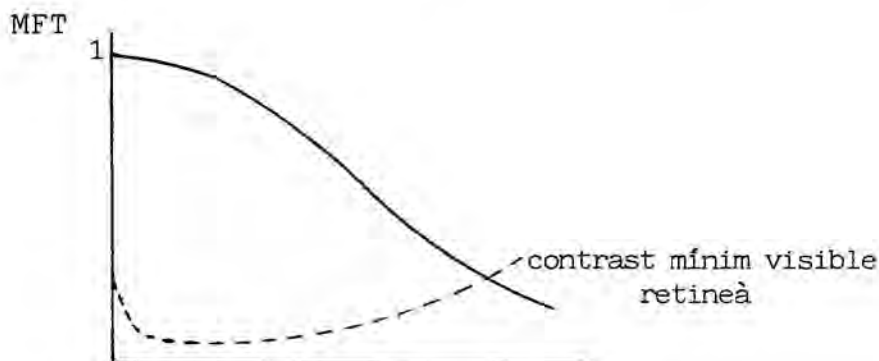
(aquesta caracterització de la pel·lícula simplifica l'ús de la funció de transmissió pel procés fotogràfic).

- valor del límit de resolució per a la parella lent-pel·lícula fotogràfica (punt L) (Marchant, 1975).

Overington proposa, per a instruments visuals, criteris com els següents:

- àrea delimitada per la corba del MFT de l'instrument, referida a la retina de l'ull, és a dir, l'àrea de la

zona compresa entre la corba representativa del contrast mínim visible retineà i del MFT de l'instrument.



(també s'indica que els resultats obtinguts amb aquest criteri coincideixen amb els de considerar l'àrea sota la corba de MFT calculada com a producte de la del sistema òptic i la inversa del contrast mínim visible retineà).

- "CTM acutance", paràmetre definit a partir dels MFT dels components del sistema (Overington, 1975).

Per a caracteritzar la qualitat de sistemes fotogràfics, Heidinger proposa un mètode basat en aproximar l'àrea sota la corba del MFT del sistema mitjançant la mesura d'aquesta funció per a dues úniques freqüències: 15 l/mm i 30 l/mm. (Heidinger, 1977).

Ooue fa una recapitulació de criteris existents fins el 1962, entre els que hi ha:

- integral de la FTO estesa a totes les freqüències.
- integral del MFT per a totes les freqüències:
- freqüència per a la que el MFT arriba a cert valor.

La conclusió que s'en treu és que, en molts casos, tots aquests criteris són adequats, podent-se triar el més fàcil de realitzar. Per contra, cap d'ells té validesa general.

En anteriors treballs del departament s'havia estudiat l'adequació de criteris de qualitat d'imatge basats en integrals del MFT del sistema. Per instruments fotogràfics de poca resolució es va proposar com a criteri més vàlid

$$\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \text{MFT}(u) O(u) u \, du}{\int_{-\infty}^{\infty} O(u) u \, du}$$

on $O(u)$ és la funció de transmissió de l'ull (Barandalla, 1973 ; Navajas, 1980 ; Vallmitjana, 1980).

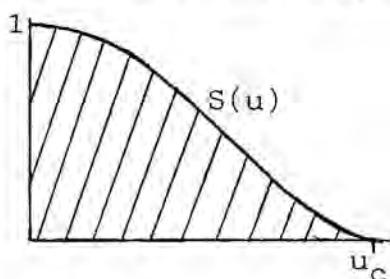
7.2.2. Criteris que es proposen per a l'estudi.

D'acord amb el que s'ha comentat a l'apartat anterior, i tenint en compte que en el nostre cas es pretén valorar un sistema opto-fotogràfic de bona qualitat, es van proposar una sèrie de criteris deduits dels valors del MFTP del sistema emprat i de les diferents caracteritzacions del sistema visual humà comentades en el capítol 5, particularitzades a les condicions d'observació adoptades.

Els criteris que es van considerar, a partir de suposar coneguda una única funció de MFTP (unidimensional) representativa del sistema d'obtenció de la imatge fotogràfica, van ser:

Criteri QA1.

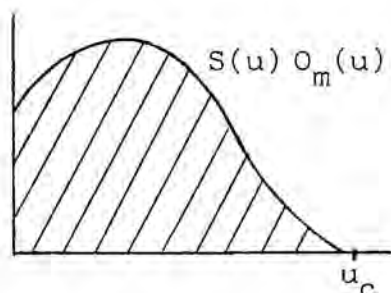
Segons aquest criteri, la qualitat d'una imatge s'assigna d'acord amb el valor obtingut de la manera següent: es calcula l'àrea de la zona compresa entre els eixos de coordenades i la corba $S(u)$ del MFTP del sistema optofotogràfic, normalitzant-la a l'àrea corresponent de l'instrument ideal (el que compleix $S(u) = 1$ per tota freqüència u). El resultat es multiplica per 100 per evitar valors petits. En la pràctica, els valors del MFTP per a altes freqüències són menyspreables i es defineix una freqüència de tall u_c .



$$100 * \frac{1}{u_c} * \int_0^{u_c} S(u) du$$

Criteri QA2.

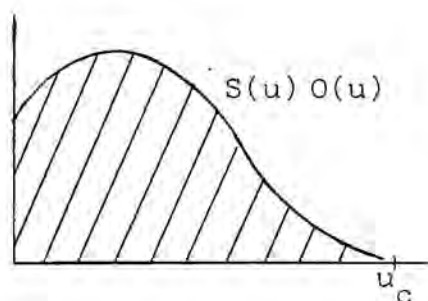
En aquest criteri es considera la intervenció de l'ull en la observació de la imatge, suposant que l'observador realitza una ponderació d'acord amb una funció de transmissió general pel sistema visual humà com la proposada per Overington (final capítol 5), designada $O_m(u)$. Es normalitza com abans.



$$100 * \frac{\int_0^{u_c} S(u) O_m(u) du}{\int_0^{u_c} O_m(u) du}$$

Criteri QA3.

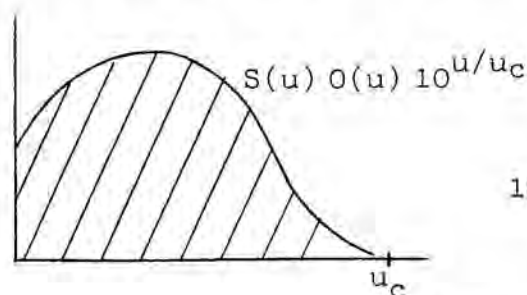
En aquest cas, la intervenció de l'ull en la visió es valora suposant vàlida una funció de transmissió particularitzada a les condicions de visualització adoptades (d'acord amb el diàmetre de la pupil·la de l'ull i la luminància de l'objecte observat), segons la caracterització deduida dels resultats de Berger-Lheureux-Robardey (capítol 5), definint 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 retineà. La normalització es realitza amb el mateix criteri que en els casos anteriors.



$$100 * \frac{\int_0^{u_c} S(u) O(u) du}{\int_0^{u_c} O(u) du}$$

Criteri QA4.

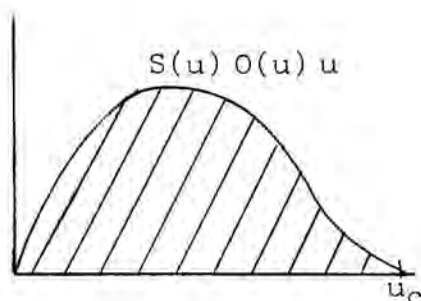
Suposant vàlida la mateixa representació de l'acció del procés visual que en el cas anterior, ara es reforça la intervenció de les altes freqüències amb un pes $10^{u/u_c}$.



$$100 * \frac{\int_0^{u_c} S(u) O(u) 10^{u/u_c} du}{\int_0^{u_c} O(u) 10^{u/u_c} du}$$

Criteri QA5.

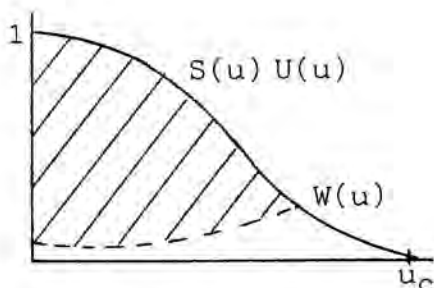
Seguint amb la caracterització de la visió proposada al QA3, es valora l'acció de les altes freqüències per una funció de pes u , és a dir, la pròpia freqüència. Aquest criteri era adequat per a l'avaluació de sistemes opto-fotogràfics de baixa qualitat.



$$100 * \frac{\int_0^{u_c} S(u) O(u) u \, du}{\int_0^{u_c} O(u) u \, du}$$

Criteri QA6.

En el cas present, la caracterització de l'intervenció de l'ull es fa a partir de les mateixes dades $U(u)$ i $W(u)$ introduïdes pel QA3, però utilitzades 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.



$$100 * \frac{\int_0^{u_c} (S(u) U(u) - W(u)) \, du}{\int_0^{u_c} (U(u) - W(u)) \, du}$$

La principal característica d'aquest criteri de qualitat és la d'eliminar l'efecte pertorbador de les "cues" de les corbes del MFTP. Aquest efecte pot ser important per la forta contribució de les cues citades en els valors donats pels criteris de qualitat que valorin molt les altes freqüències. Així, per exemple, per una part la pròpia mesura del MFTP a altes freqüències és imprecissa; per altra part no sembla lògic que valors del MFTP inferiors a 0,05 o similars contribueixin a la visió de la imatge i, a més, la presència d'una cua llarga pot alterar molt el valor numèric del criteri. En resum, resulta convenient evitar aquests valors ínfims del MFTP a altes freqüències, el qual es pot fer considerant la significació del contrast mínim visible per la retina.

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

7.2.3. Limitacions. Nous criteris.

En els sis criteris proposats s'ha suposat que l'efecte del sistema formador de la imatge es pot representar per una funció $S(u)$ única. Això no ofereix ambigüïtat quan les zones de treball corresponen a regions centrades en 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 cilíndrica, és a dir, en regions del camp de l'instrument apartades de l'eix òptic. En aquest cas, com se sap, hi ha dues direccions privilegiades per a les que, en el nostre cas, es determinaran els valors del MFTP unidimensional.

Ja es 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 secció tangencial i sagital) i la inferior d'elles. Aixó es va comprovar en les primeres observacions, de manera que es pot afirmar que tot el bona que sigui la funció de transferència en una direcció no compensa el dolenta que sigui en l'altra, a efectes de qualitat d'imatge.

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 determinar la ponderació correcta.

En una primera fase es va intentar trobar aquesta ponderació de manera tentativa, assajant factors de pes arbitraris fins obtenir valoracions numèriques que s'assemblassin a les ordenacions efectuades pels observadors. Però llavors sorgia un altre problema: si es determinaven factors de pes per a les funcions de transmissió tangencial i sagital que fossin

adequats per a l'ordenació de les proves corresponents a les sèries d'imatges en zona de camp, llavors els valors de qualitat obtinguts d'aquesta manera resultaven petits per a la comparació amb les proves de sèries en zona d'eix. El següent pas seria intentar trobar altres paràmetres arbitraris per a solucionar aquest fet.

Tot plegat, la qüestió era complexa i, sobre tot, no es tenia cap criteri justificat per assignar factors de pes.

En aquest punt es proposen dues possibilitats per a superar la dificultat, ambdues basades en el caràcter bidimensional de la funció MFTP. La primera possibilitat consisteix en avaluar la qualitat per un criteri volúmic, en lloc de considerar criteris d'àrea. Concretament, pot pensar-se que la qualitat de la imatge, en relació a la intervenció del sistema opto-fotogràfic formador, ve donada pel volum interceptat per la superfície representativa del MFTP en un espai tridimensional.

Una altra possibilitat, conceptualment més complexa, és la de considerar que la corba única representativa del sistema opto-fotogràfic és la mitjana de les corbes que es determinen per seccions uniformement distribuïdes angularment, sobre la superfície del MFTP bidimensional. O equivalentment, per a cada freqüència u el valor de la funció única representativa es determina calculant la mitjana del valor del MFTP sobre una circumferència de radi u en el pla de les freqüències espacials (u_x, u_y) .

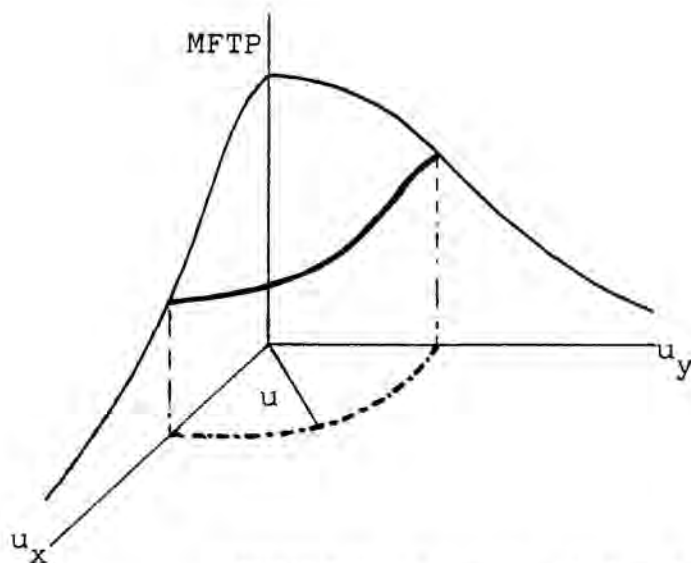


FIGURA 7-5 .- Manera de calcular el valor mig del MFTP per a una freqüència espacial u .

Amb tot, per poder aplicar les propostes anteriors, es necessita el coneixement de la funció MFTP bidimensional, de la que sols s'en tenen dues seccions perpendiculars. Per raó de simetria i com a suposició de treball que hauran de justificar els propis resultats obtinguts, es va fer l'hipòtesi que la forma de la superfície del MFTP és tal que les seccions corresponents a plans d'igual valor del MFTP (plans paral·lels al pla de les freqüències) són sempre el·líptiques.

Aquesta suposició es justifica també, en part, per la forma de les MFTP unidimensionals que es tenien, les quals no presenten mai inversions de contrast i són sempre de decreixement suau, tal com es veurà al capítol 9.

La primera de les possibilitats comentades va donar lloc a la definició de dos nous criteris de qualitat:

Criteri QV1.

Es defineix la qualitat d'imatge a partir del número 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. Aquest valor es normalitza al corresponent a l'instrument ideal (MFTP = 1 sempre) i es multiplica per 100. En la pràctica es considerarà una freqüència de tall com pels criteris d'àrea

$$100 * \frac{\int_0^{u_c} \int_0^{u_c} S(u_x, u_y) du_x du_y}{\pi * u_c^2}$$

Aquest criteri de qualitat constitueix la generalització al cas volúmic del criteri de qualitat QA1, on es valorava d'acord amb l'àrea tancada per la secció del MFTP.

Criteri QV2.

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

Aquest criteri de qualitat constitueix la generalització al cas volúmic del QA6, és a dir, la valoració es fa considerant sols els contrastos superiors al mínim visible per la

retina, però ara no es considera l'efecte del sistema òptic de l'ull (com es feia en el QA6).

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

Així, doncs, s'han definit una serie 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. Però també s'ha proposat un mètode per a obtenir una única corba de MFTP a partir del coneixement de les seccions tangencial i sagital amb el qual se li podran aplicar igualment els criteris de qualitat d'àrea. Això és el que es farà, en la pràctica, amb les proves corresponents a zones de camp de l'instrument.

Els avantatges de tot el que s'ha exposat estan en la seva fàcil interpretació i en l'eliminació de factors de pes arbitraris. Els inconvenients (o objeccions) són les d'haver de fer la suposició de que les seccions de la superfície del MFTP són el·líptiques i la dificultat dels programes de càlcul de corbes mitjanes i volums.

7.2.4. Relació entre els criteris d'àrea i els volumícs.

Consideri's el volum que, a l'espai tridimensional, determina la superfície del MFTP i el pla de les freqüències.

Pot expressar-se com

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

o, en coordenades polars,

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

però la integral $\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi S(u, \phi)$ no és més que 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 u (QA5).

8.

REALITZACIONS PRACTIQUES.

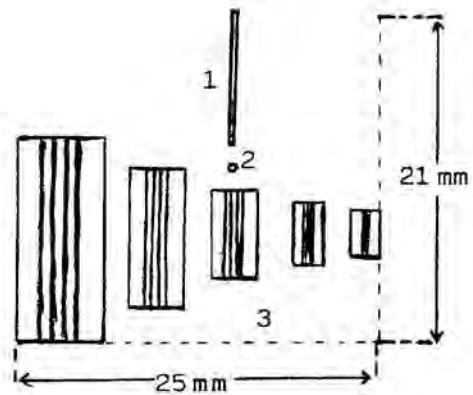
8.1. TEST DE MESURA DEL MFTP I OBJECTE DE PROVA UTILITZAT.

8.1.1. Test de mesura.

Per a la mesura del MFTP d'un sistema opto-fotogràfic es va construir un test capaç de cobrir el marge de freqüències d'interès, possibilitant la utilització de dos mètodes de mesura: per anàlisi de la imatge d'una escletxa objecte o per comparació de contrastes d'un objecte de variació sinusoidal i de la seva imatge.

Les característiques del test de mesura són:

FIGURA 8-1 .- Test de mesura del MFTP d'un sistema opto-fotogràfic.



(1) Escletxa construïda amb filtres neutres, segons les exigències de 3.3.1.:

amplada: $5,3 \cdot 10^{-2}$ mm.

densitat òptica centre: 0,3 .

densitat òptica vores: 2,3 .

(2) Diafragma puntual de referència: $\emptyset = 6,0 \cdot 10^{-2}$ mm.

(3) Sèries sinusoïdals, de freqüències: 0,99 , 2,1 , 3,3 , 4,1 , 5,3 (línies per milímetre).

El càlcul dels contrastos que corresponien a cada una de les sèries requereix comentaris addicionals. En primer lloc, les dimensions de les sèries són macroscòpiques, de manera que no es pot calcular el contrast realitzant una única escombrada. El que es va fer va ser considerar la mitjana dels valors obtinguts per mesures microdensitomètriques realitzades en diferents seccions equidistants de cada sèrie, com les a, b, c i d de la figura 8-2.

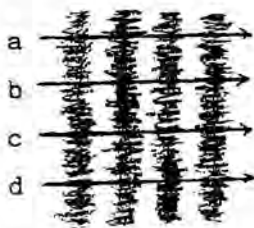


FIGURA 8-2 .- Mesures pel càlcul del perfil d'una sèrie sinusoïdal objecte.

També s'ha de tenir en compte que les sèries constaven de tres màxims i quatre mínims, amb truncació final del tipus indicat a la figura 8-3, de tal manera que els valors de la transmitància dels diversos màxims no eren idèntics, ni tampoc els dels mínims. Això és una dificultat addicional en la definició del contrast de la sèrie.

El mode d'operar per a obtenir el contrast de una sèrie de les que formaven el test va ser:

- realització de quatre escombrades independents i equidistants, tal com s'indica en la fig. 8-2.

- càlcul de la mitjana de les quatre escombrades, tenint especial cura de superposar-les correctament (això es va fer mitjançant un programa d'ordinador que localitzava el primer mínim de cada escombrada i sumava els valors a partir d'aquest punt comú).
- a la mitjana de les escombrades es definia el contrast mig C_m i el corresponent al màxim central únicament C_c :

$$C_m = \frac{M_1 + M_2 + M_3}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \quad C_c = \frac{M_2}{m_2 + m_3}$$

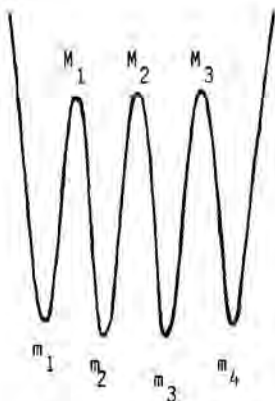


FIGURA 8-3 .- Definició del contrast mig i del contrast del màxim central d'una sèrie sinusoïdal.

8.1.2. Objecte de prova utilitzat.

En l'elecció de l'objecte amb el que es realitzarien les comparacions dels observadors, es van tenir en compte les indicacions fetes per diversos investigadors del tema, remarcant especialment la necessitat de contenir moltes freqüències espaials i detalls en totes les direccions del pla objecte. Concretament, es va seleccionar una fotografia d'una sènia del parc d'atraccions de Montjuïc que s'adaptava perfectament a les necessitats del problema plantejat.

Les dimensions de l'objecte eren 10 x 8 cm, de manera que amb l'augment amb que es treballava ($-1 / 10$ aprox.), les dimensions de la imatge asseguraven l'isoplanatisme del sistema òptic.

L'objecte estava en un pla perpendicular a l'eix òptic, a una distància de 243 cm de la primera superfície del sistema òptic. La determinació de la col·locació respecte a l'eix òptic es va realitzar muntant un laser de feix molt prim sobre el propi banc de treball. Per a les fotografies en camp, l'objecte es desplaçava horitzontalment 21,5 cm, de manera que l'angle respecte l'eix era d'uns 5° .

8.2. SISTEMA ÒPTIC.

Per obtenir imatges fotogràfiques bones a les quals aplicar els criteris de qualitat, es va adoptar com a sistema òptic un teleobjectiu fotogràfic de les següents característiques:

Meyer-Optik Gorlitz 4154842.

Orestegor.

focal : 200 mm.

obertura màxima : $4 / f$.

Els motius de l'elecció van ser:

- ser un instrument de bona qualitat.
- ser un instrument utilitzat comercialment.

- ser un instrument de gran focal, per a que la imatge no resulti excessivament petita.

Les condicions en que es van registrar les fotografies corresponien sempre a posicions en les que la imatge recollida era de bona qualitat. Concretament, es va treballar en eix i en camp i amb número de diafragma 4 i intermig entre 8 i 11.

Com que el punt de vista que interessava era el de l'estudi de la qualitat d'imatge en relació amb el MFTP, no es va adoptar el conveni de triar fotografies corresponents a posicions uniformement distribuïdes en tot el camp d'utilitat de l'instrument. El que es va procurar va ser aconseguir varietat de morfologies en les corbes de MFTP, intentant que corresponguessin a qualitats d'imatge comparables. Per això no es van seleccionar moltes proves en eix i obertura petita i, en canvi, es va forçar una mica el camp normal d'utilització de l'instrument de manera que fos lleugerament major que el que correspon a pel·lícula 24 x 36 .

En primer lloc es van determinar les zones de l'espai imatge que corresponien a bona qualitat d'imatge obtinguda, fixada la posició de l'objecte. Per a determinar la posició del pla imatge paraxial es van analitzar les imatges fotogràfiques del diafragma puntual obtingudes amb el diafragma del sistema molt tancat, observant-les amb el microscopi. De manera similar es varen determinar les corbes d'astigmatisme. En el proper capítol s'indiquen les posicions corresponents a les proves finals seleccionades.

Per a aquestes mateixes posicions es van enregistrar fotografies del test de mesura del MFTP. Mitjançant l'anàlisi d'aquestes fotografies es calculava el MFTP del sistema opto-fotogràfic en les mateixes condicions en que s'obtenien les imatges que s'havien d'observar i comparar. Per a les posicions en zona de camp es registraven dues fotos del test: una en la que es col·locava adequadament per a la mesura del MFTP en la direcció tangencial i una altra per a la sagital. Concretament, com que l'objecte en camp estava desplaçat horitzontalment respecte l'eix òptic, les dues fotos corresponien al test situat, en el lloc del propi objecte, horitzontal o verticalment. Quan l'esclatxa o les barres del test es situaven horitzontalment, la seva imatge permetia la mesura del MFTP tangencial i si l'esclatxa o les barres es situaven verticalment, la imatge recollida servia per mesurar la funció MFTP sagital.

8.3. SISTEMA FOTOGRÀFIC.

Per a possibilitar l'aplicació del concepte de MFTP amb la màxima senzillesa i exactitud, es va adoptar com a pel·lícula de registre fotogràfic la Kodak Ektachrome 5071, en unes condicions d'exposició i processat ben determinades (Vallmitjana, 1980).

Aquesta pel·lícula inversible en color està concebuda per a ser utilitzada en el duplicat de diapositives. Per

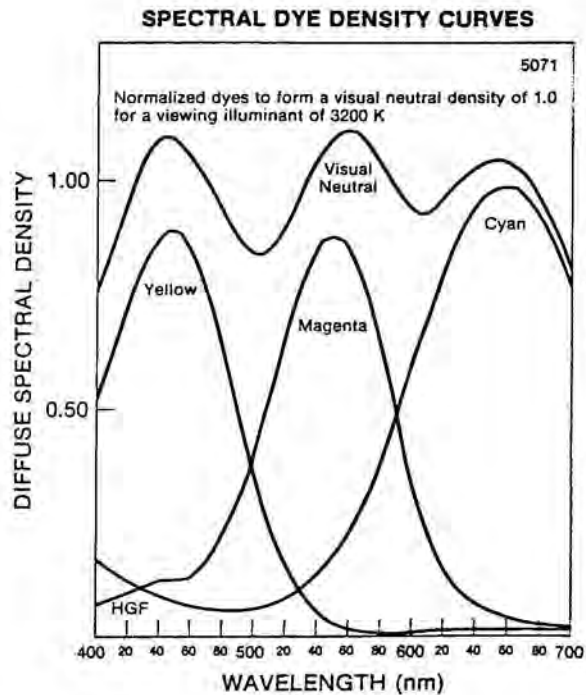
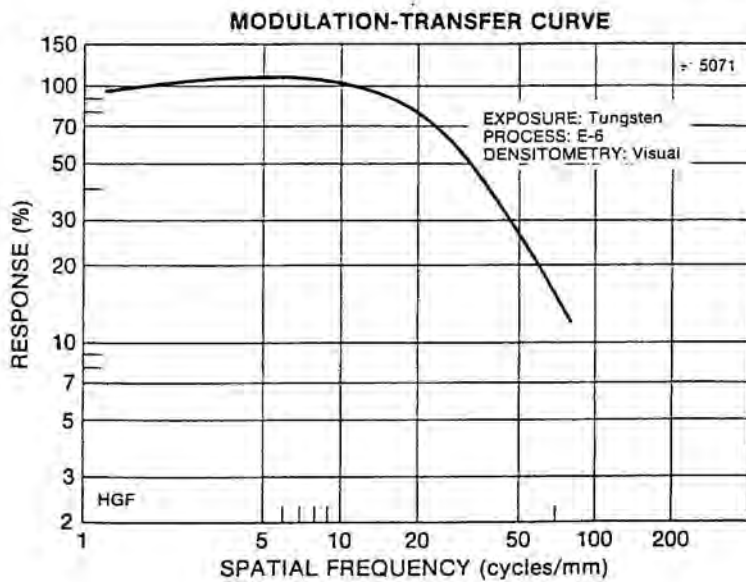
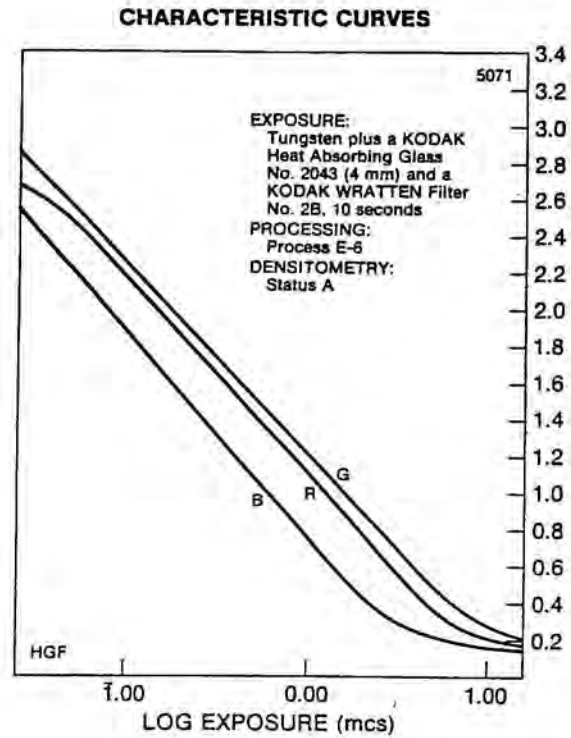
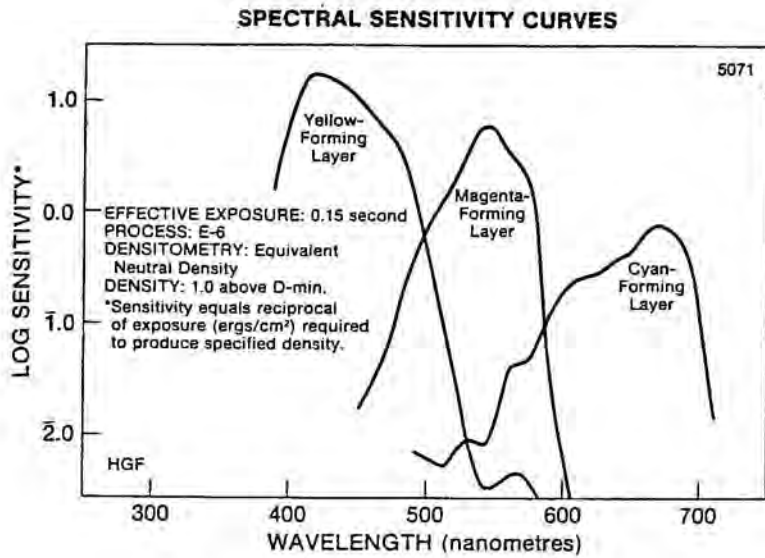


FIGURA 8-4 .- Valores nominales característicos de la película Kodak Ektachrome 5071. (dades del fabricant).

Amb el microdensitòmetre del laboratori es poden realitzar mesures de densitometria especular, el que s'ha de tenir en compte en analitzar els resultats. Les característiques de les pel·lícules fotogràfiques tal com es presenten en els catàlegs comercials, en canvi, es refereixen sempre a densitometria difosa.

Amb tot, en el cas de la pel·lícula emprada en el treball, la diferència desapareix pel fet que el seu factor "Q" és molt proper a la unitat. Això és així perquè el material constitutiu de les tintes que coloregen resulta poc dispersiu per la llum. En canvi, si es comparen els valors nominals de densitat d'una escala de grisos com la Kodak Step Tablet nº 1 amb els mesurats pel microdensitòmetre del laboratori, llavors les divergències són notables, sobre tot per a les altes densitats òptiques. En aquest cas l'ennegriment de l'escala de grisos és degut a partícules de carbó, altament dispersives de la llum.

ii) Com que la mostra que s'analitza en el microdensitòmetre és colorejada, cal definir l'il.luminant amb el que es realitzaran les mesures. Després de l'anàlisi efectuada en l'apartat 4.1.3., és clar que cal realitzar les densitometries il.luminant amb radiació de composició espectral igual a l'utilitzada per a il.luminar l'objecte, que no és altra que la recomanada per a la pel·lícula que s'està usant, és a dir, la corresponent a 3200 K de temperatura de color.

8.4. MARGE DE FREQUÈNCIES.

La qualitat de la imatge formada per un sistema òptic o optofotogràfic estarà estretament relacionada amb la banda de freqüències espaials que conté. Justament l'objectiu del present treball és precisar aquesta dependència. Per tant, una qüestió prèvia a tenir en compte és l'ordre de magnitud de la màxima freqüència espacial que estarà present a les proves que s'observaran.

Per a valorar convenientment aquesta qüestió, cal examinar la limitació que van introduint els diversos factors que intervenen en la formació de la imatge final.

Així, en primer lloc, intervé el propi objecte. L'objecte, en general, contindrà totes les freqüències espaials pel fet de que en ell hi haurà contorns contrastats. Sols en alguns casos molt especials serà el propi objecte el que limiti la banda de freqüències espaials que apareixin en la imatge final a observar.

El següent factor que intervé és el sistema formador de la imatge que es registrarà fotogràficament, és a dir, l'objectiu fotogràfic o la lent utilitzada. La limitació freqüencial que introdueix depèn de la seva qualitat, o sigui, de les seves característiques de disseny i construcció. Amb tot, en el cas d'objectius fotogràfics com el que s'ha utilitzat,

és fàcil comprovar que el poder resolutiu en el pla imatge és de l'ordre dels centenars de línies per milímetre, el que significa en termes de funció de transmissió, que la corba representativa del MFT no s'anulla fins a aquests centenars de línies com a mínim.

El següent pas en la formació de la imatge que s'observarà és el procés fotogràfic: registre i revelat de la placa fotogràfica. Suposada l'aplicabilitat del concepte del MFTP al procés fotogràfic que es realitza o, senzillament, considerant el concepte de poder resolutiu de la pel·lícula tal com es presenta als catàlegs, és fàcil veure que el procés fotogràfic introduirà una forta limitació freqüencial en la imatge final.

Efectivament, la pel·lícula Kodak Ektachrome 5071 té un poder resolutiu nominal de 63 l/mm per a un contrast objecte de 1,6 : 1. Com que l'objecte original no és molt contrastat i, a més, el que impressiona la placa és la seva imatge pel sistema òptic, pot deduir-se que la pel·lícula podrà enregistrar fins a unes 60 o 70 l/mm, o, en llenguatge de MFT, aquesta funció s'anulla cap a les 70 l/mm.

En aquest punt és interessant notar que la banda de freqüències que caracteritza la imatge fotogràfica del pipus comercial normal és l'interval des de 0 a 50 o 60 l/mm (Heidinger, 1977). Això serà així, doncs, sempre que no s'utilitzi pel·lícula de característiques molt diferents: de tipus científic, de registre d'holografies, etc.

Per tant, la significació correcta dels resultats que s'analitzen en el present treball es limita a la qualitat de fotografia "comercial", en la que la pel·lícula fotogràfica és qui determina que la banda de freqüències espaials que intervenen quedi entre els valors expressats.

Encara intervenen altres factors en el procés de visualització de la imatge final: el projector de diapositives i el propi sistema visual humà, la intervenció del qual dependrà de les condicions d'observació que s'adoptin en la pràctica.

El projector de diapositives juga un paper similar al del propi sistema formador de la imatge sobre la placa fotogràfica. Amb tot, la seva intervenció no es considerarà. Per dos motius principals:

i) la seva funció de transmissió és alta per a totes les freqüències espaials que conté la diapositiva que es projecta per a l'observació.

ii) pel fet de projectar les diapositives per parelles i utilitzant projectors idèntics, la intervenció d'aquests és també idèntica per ambdues proves, de manera que no influeixen en la seva comparació.

La influència de les condicions de visualització adoptades s'analitzarà en l'apartat 8.6.

8.5. COMPARACIÓ EXPERIMENTAL DE DOS MÈTODES DE MESURA DEL MFTP.

Després del que s'ha comentat en l'apartat anterior sobre el valor de la màxima freqüència espacial present en les mostres fotogràfiques a analitzar, pot abordar-se el problema concret del càlcul de la transformada de Fourier de la imatge de l'esclatxa i del MFTP del sistema opto-fotogràfic.

La qüestió bàsica en anàlisi de senyals, tal com s'ha indicat a 2.3., és el de realitzar una digitalització suficientment estreta per a evitar el solapament de freqüències (aliasing), però que no resulti excessiva de manera que desaprofiti informació per a freqüències intermèdies. La solució d'aquest problema és trivial quan se sap per davant la màxima freqüència present en el senyal a analitzar. Recordant que en el nostre cas la freqüència espacial està limitada, com a molt, a 80 l/mm, resulta suficient realitzar una digitalització $\Delta = 3,9\mu\text{m}$, per a la qual la freqüència de Nyquist és de 128 l/mm. Llavors, considerant pel càlcul de la transformada un total de 128 punts mostrejats a intervals Δ a la sortida del microdensitòmetre corresponent a la mesura de la imatge de l'esclatxa del test de MFTP, s'obtidran els valors del MFTP a intervals de freqüència de 2 l/mm fins les 128 l/mm.

La realització detallada dels càlculs era:

i) utilitzant 128 punts per poder fer servir l'algorisme FFT, es calcula per ordinador la seva transformada de Fourier.

ii) el mòdul de la transformada calculada es divideix, freqüència a freqüència, per la funció de transmissió del microdensitòmetre, que sols depèn de l'amplada de la seva esclatxa d'escombrada (que es va fixar en $6\mu\text{m}$).

iii) el resultat de la divisió d'abans es divideix, també freqüència a freqüència, per la transformada de Fourier (mòdul) de l'objecte original, que no es altre que una esclatxa ideal d'amplada $5,3 \cdot 10^{-5} \times (1/10,42)$ metres.

És evident que aquests dos últims passos del càlcul són equivalents ja que corresponen a dividir el mòdul de la primera transformada per dues funcions sinc que corresponen, respectivament, a la funció de transmissió del microdensitòmetre i al mòdul de la transformada de Fourier de l'objecte utilitzat pel càlcul del MFTP.

iv) el resultat de iii) es normalitza a la unitat per a la freqüència zero.

Pels càlculs posteriors sols es van conservar 26 valors dels obtinguts: el corresponent a freqüència zero, que sempre és 1, i els corresponents a les freqüències 2, 4, ..., 50 (1/mm). Així es cobreix un marge des de 0 a 50 1/mm que resultarà suficient pels nostres propòsits, encara que algunes (poques) funcions de transmissió de les considerades arriben a les 50 1/mm amb valor considerable.

Per a les mesures de les imatges dels tests sinusoidals no és necessari fer cap tractament matemàtic. En aquest cas sols cal realitzar el quocient de contrastos d'imatge i origi-

nal respectiu per a cada freqüència espacial per a la qual es vol mesurar el MFTP. Amb tot, aquest mètode no resulta tant senzill en la pràctica.

En primer lloc, principalment per a freqüències altes, cal corregir el contrast mesurat pel microdensitòmetre segons la funció de transmissió de l'aparell.

Però les principals dificultats sorgeixen a l'hora de definir el contrast d'una sèrie imatge, tal com passava al considerar el propi test de mesura del MFTP. Com que les dimensions d'aquestes sèries són suficientment petites, ja no és necessari amitjar mesures corresponents a diferents seccions transversals (l'augment del sistema òptic és aproximadament $-1/10$). En canvi, la definició del contrast imatge és més difícil, per dues raons: la no linealitat rigorosa del sistema fotogràfic per a altes freqüències (per causa del fenomen d'adjacència) i la limitació en el nombre de períodes de la sinusoïde utilitzada. Ambdós efectes, relacionats entre si, podien produir imatges amb un perfil microdensitomètric com el presentat en la figura 8-5.



FIGURA 8-5 .- Perfil microdensitomètric de la imatge d'una sèrie sinusoidal d'alta freqüència espacial.

Es pot concloure, doncs, que en les altes freqüències no es pot esperar un resultat significatiu en la mesura del contrast ni tenint en compte l'error de truncació. De fet, la dificultat radica en la pròpia definició del contrast en un perfil densitomètric tan apartat del teòric.

Amb tot, es va veure que la millor definició possible del contrast que es pot donar és la del corresponent únicament al màxim central. S'observa a la figura 8-5 que és el que manté millor el seu perfil.

Els resultats de la comparació de mesures obtingudes per anàlisi d'imatge d'esclatxa i per quocient de contrastos definits a partir del màxim central es presenten a la figura 8-6.

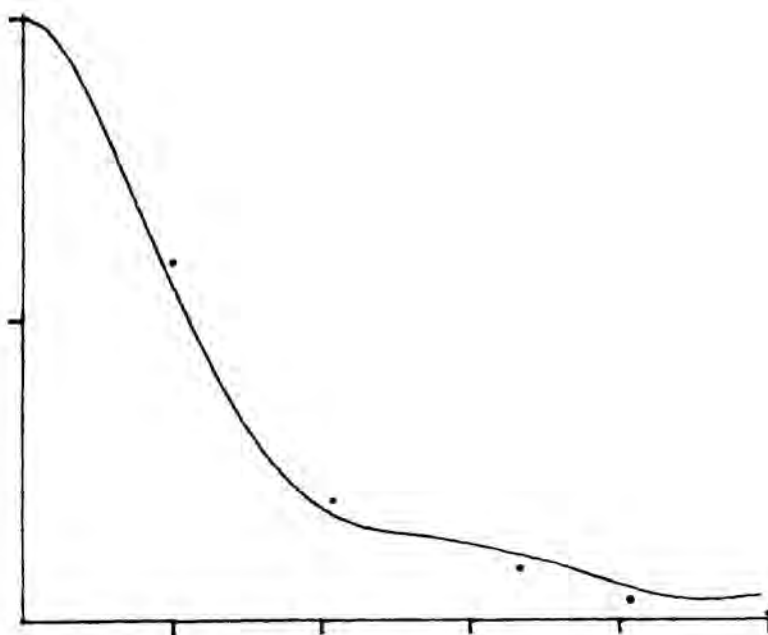


FIGURA 8-6 .- Comparació de mesures per imatge d'esclatxa i per contrast de test sinusoidal. (La corba contínua correspon a la interpolació de 26 punts obtinguts per anàlisi de la imatge d'una esclatxa. Els punts · s'han calculat mesurant el contrast del màxim central de la sèrie imatge de la freqüència corresponent).

8.6. CONDICIONS DE VISUALITZACIÓ.

Per facilitar al màxim la comparació, les proves es projectaven per parelles mitjançant dos projectors idèntics Agfa Diamator A, amb objectiu de 85 mm Agfa Agomar 1 : 2,8. El propi observador disposava dels comandaments d'enfoc a distància de manera que, accionant-los, efectuava la comparació quan cada una de les proves es veia el més nítida possible. D'aquesta manera s'anul·lava la influència del projector en la comparació.

Respecte a les distàncies de projecció i observació, el criteri de selecció va ser el que la màxima freqüència que pogués contenir la prova fos ben apreciada per l'ull al mirar-la sobre la pantalla. Suposem que aquesta freqüència sigui 50 l/mm. Segons els valors de la funció de transmissió de l'ull (amb petites diferències entre diferents investigadors) aquesta val 0,3 per a 25 línies per grau. Aquesta és la correspondència que es voldrà aconseguir amb adequades condicions de projecció i d'observació: 25 l/grau de l'ull amb 50 l/mm de la diapositiva. Per a tenir-ho s'han utilitzat els projectors amb augment -22 i s'han fet les observacions a 63 cm de distància de la pantalla, doncs llavors la màxima freqüència present en la pantalla serà 50/22 l/mm i, observada a 63 cm correspon a

$$\frac{50}{22} (1/\text{mm}) * \frac{630}{57,3} (\text{mm}/\text{grau}) = 25 \text{ l}/\text{grau}.$$

En aquestes condicions, el diàmetre de la nineta de l'ull durant l'observació era $\varnothing = 4 \text{ mm}$ i la luminància mitjana de la pantalla d'uns 25 nit.

Les funcions de transmissió de l'ull $O_m(u)$ i $O(u)$ definides a 7.2.2. es comparen a la figura 8-7, on sobre l'eix d'abscisses s'han posat freqüències espaials a la diapositiva. També es presenten les funcions $U(u)$ i $W(u)$ (MFT del sistema òptic de l'ull i contrast mínim visible retineà) deduides de les dades de Berger-Lheureux-Robardey.

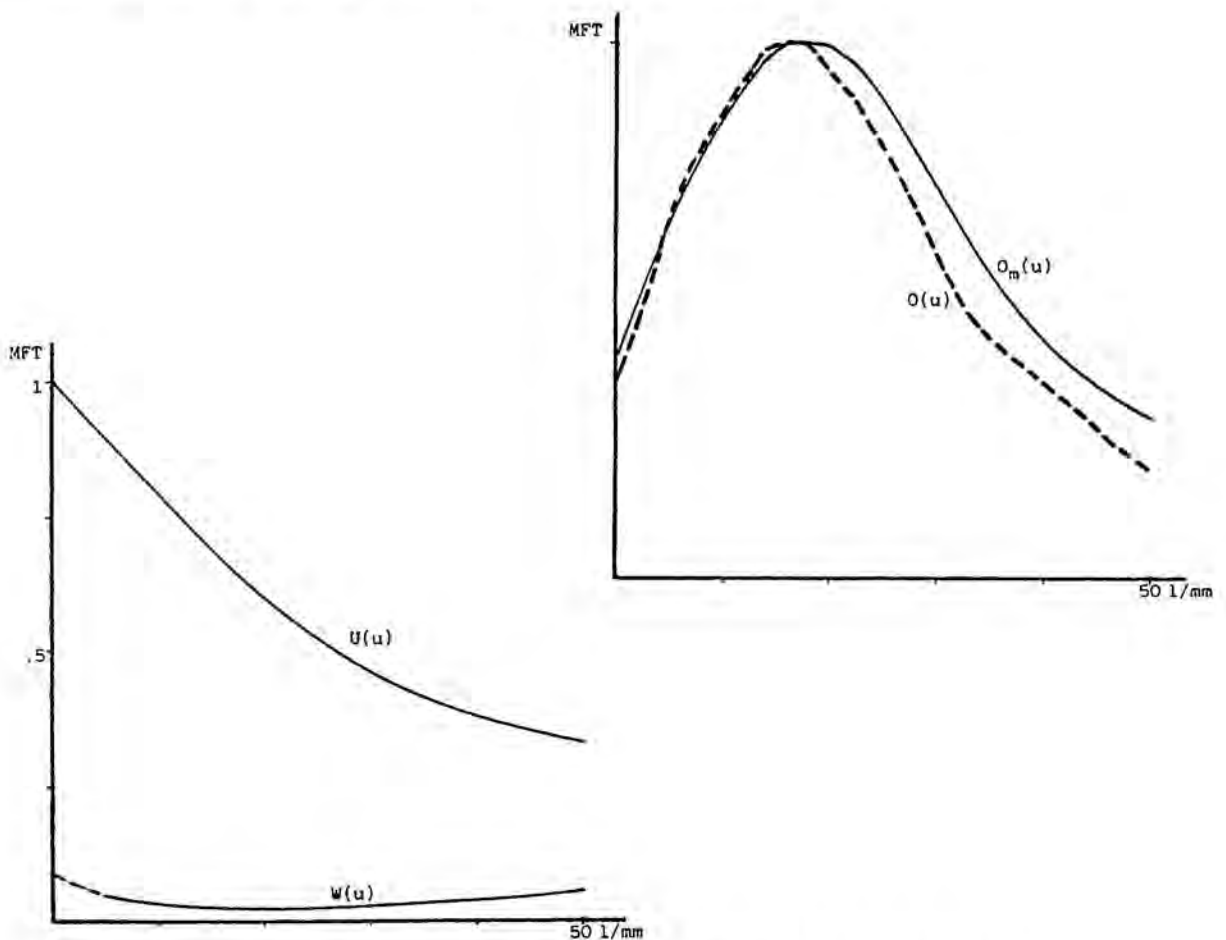


FIGURA 8-7 .- Funció de transmissió del sistema Òptic de l'ull $U(u)$ i contrast mínim visible retineà $W(u)$.
Funció de transmissió del sistema visual $O_m(u)$ comparada amb la $O(u)$ deduida de la inversa del mínim visible retineà.

9.

RESULTATS.

9.1. ORDENACIONS VISUALS DELS OBSERVADORS.

Per tenir una referència amb qui comparar els valors numèrics donats pels diferents criteris de qualitat que s'han definit, es va elaborar una llista d'ordenacions de qualitat, segons l'apreciació d'un conjunt d'observadors experts. Se'ls va indicar que la seva qualificació havia de respondre a una valoració de qualitat el més objectiva possible, segons el contrast, la resolució, la nitidesa, la reproducció de l'original, etc, reduint el més possible els factors subjectius.

En total es van considerar 25 proves, obtingudes en unes condicions per a les que es coneix el MFTP del sistema utilitzat. La numeració d'aquestes proves és arbitrària. Per altra part, es va determinar el pla paraxial (aquell en que s'obtenia la imatge més petita d'un punt objecte). Amb tot això, designant per 0 la posició d'aquest pla, per negatives les distàncies des d'ell cap el sistema òptic i com positives les que van des del pla paraxial allunyant-se del sistema òptic, resulta que les diferents proves corresponen a les posicions indicades en al figura 9-1.

Les proves 01, 02, 03, 04, 05, obtingudes en eix i amb número de diafragma 4, formen la sèrie EDG. Les proves 14,.. 20, obtingudes en eix pero amb diafragma intermig al 8 i 11, formen la sèrie EDP.

De la mateixa manera, les proves obtingudes en camp s'agrupen en les sèries CDG (proves 06, 07,...12) i CDP (proves 22, 23,...27).

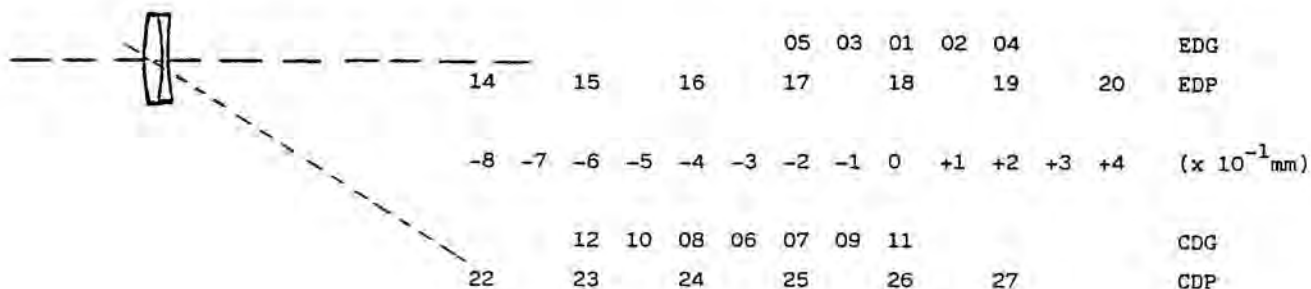


FIGURA 9-1 .- Posicions del camp imatge a les que corresponen les diferents proves (el pla paraxial es designa 0).

El mètode seguit per obtenir les ordenacions dels observadors constava de tres fases. En la primera es començava per l'ordenació independent de cada una de les sèries (EDG, EDP, CDG, CDP), ja que la elecció entre proves és més fàcil quan la morfologia del MFTP és similar.

En el següent pas, es col·locaven a cada aparell projector les proves de cada una d'aquestes sèries, ordenades entre elles en ordre decreixent de qualitat observada. Llavors es projectaven simultàniament les sèries EDG i EDP, i després les CDG i CDP. D'aquesta manera s'intercalaven entre si les proves corresponents a les sèries d'eix, obtenint-se una sèrie única que es designarà EIX, i, igualment, s'intercalaven les proves en camp originant la sèrie anàloga, que es designarà CAMP.

Finalment es projectaven simultàniament les proves de zona d'eix i de zona de camp, ordenades abans, aconseguint-se la intercalació que corresponia a la ordenació definitiva.

Amb aquest mètode es disminuïa la dificultat de la valoració de proves corresponents a situacions amb corbes de MFTP bastant diferents.

En tot el casos, quan l'observador manifestava dubte o incorria en contradicció, es repetien les valoracions confuses fins l'aclariment de la qüestió.

Les ordenacions realitzades pels observadors per a cada una de les sèries van ser:

Sèrie EDG

Obs1	03	01	05	02	04
Obs2	01	03	05	02	04
Obs3	03	01	05	02	04
Obs4	03	01	05	02	04
Obs5	03	01	05	02	04

Sèrie EDP

Obs1	17	18	16	19	15	20	14
Obs2	17	18	16	19	15	20	14
Obs3	18	17	16	19	20	15	14
Obs4	17	18	16	19	15	20	14
Obs5	17	18	16	19	15	20	14

Sèrie CDG

Obs1	06	07	09	08	11	10	12
Obs2	06	07	09	08	10	11	12
Obs3	06	07	08	09	11	10	12
Obs4	06	07	09	08	11	10	12
Obs5	06	07	09	08	10	11	12

Sèrie CDP

Obs1	24	25	23	26	27	22
Obs2	24	25	23	26	27	22
Obs3	24	25	23	26	27	22
Obs4	24	25	23	26	27	22
Obs5	24	25	23	26	22	27

S'observa que les diferències entre les ordenacions dels diversos observadors són mínimes.

Sèrie EIX

Obs1	17	18	16	03	19	01	05	15	02	20	04	14
Obs2	17	18	16	19	01	03	05	15	02	20	04	14
Obs3	18	17	16	03	19	01	05	02	20	15	04	14
Obs4	17	18	16	19	03	01	05	02	15	20	04	14
Obs5	17	18	16	19	03	01	05	02	15	20	04	14

Sèrie CAMP

Obs1	24	25	23	26	06	07	27	09	22	08	11	10	12
Obs2	24	25	23	26	06	27	07	22	09	08	10	11	12
Obs3	24	25	23	26	06	07	27	22	08	09	11	10	12
Obs4	24	25	23	26	06	07	27	22	09	08	11	10	12
Obs5	24	25	23	26	06	22	27	07	09	08	10	11	12

Tampoc són grans les diferències en les ordenacions de les sèries anteriors.

Les majors diferències sorgeixen a l'hora d'establir una ordenació final única.

Obs1	17	18	16	03	19	01	05	24	25	23	15	26	02	20	06	07	27	09	04	22	08	11	10	14	12
Obs2	17	18	16	19	01	03	24	05	25	23	26	15	02	20	06	27	07	04	22	09	08	10	14	11	12
Obs3	18	17	16	03	19	01	24	05	25	23	02	26	20	15	06	04	07	27	22	08	09	14	11	10	12
Obs4	17	18	16	19	03	01	05	24	25	23	02	15	26	20	04	06	07	27	22	09	08	11	14	10	12
Obs5	17	18	16	19	03	01	24	25	05	23	26	02	15	20	06	22	04	27	07	09	08	10	11	14	12

Analitzant les ordenacions totals, a primera vista sembla que hi ha moltes divergències, però en realitat aquestes no són grans.

Efectivament, en molts casos la qualitat de les imatges observades era molt semblant, de manera que resultava difícil la tria. De vegades, inclús, alguns observadors qualificaven algunes proves com pràcticament equivalents.

Així, doncs, moltes vegades cal interpretar les discrepàncies com a dificultats de classificació. Sols hi ha un cas significatiu en el que es pot parlar de divergències: al valorar la qualitat d'imatges corresponents a proves de sèries en camp. En aquest cas, alguns observadors tendeixen a seleccionar com millors les proves de posicions més properes a la focal sagital respecte a proves més properes a la focal tangencial. D'altres, en canvi, ho fan justament de manera contrària.

Naturalment, això podria dependre decissivament de les característiques concretes de l'objecte de prova utilitzat, és a dir, de que tingui major o menor contingut de detalls horitzontals o verticals. Per a minimitzar aquesta possibilitat, es va triar un objecte amb abundor de detalls en totes direccions. De totes maneres, es presenten inversions d'ordenació d'aquest tipus en casos com les parelles de proves 09 i 08, 10 i 11, malgrat que es va advertir els observadors de la circumstància citada i de la necessitat de que valoresin totes les direccions.

9.2. VALORACIONS SEGONS ELS CRITERIS.

Tenint sempre presents quines són les ordenacions visuals de referència donades pels observadors, es pot analitzar el funcionament dels diferents criteris de qualitat proposats en el capítol 7 i el grau de coincidència de les ordenacions que produeixen amb les dels observadors. S'ha de tenir en compte, també, que no es pot definir una ordenació visual única, sinó que existeixen diverses valoracions de referència equivalents.

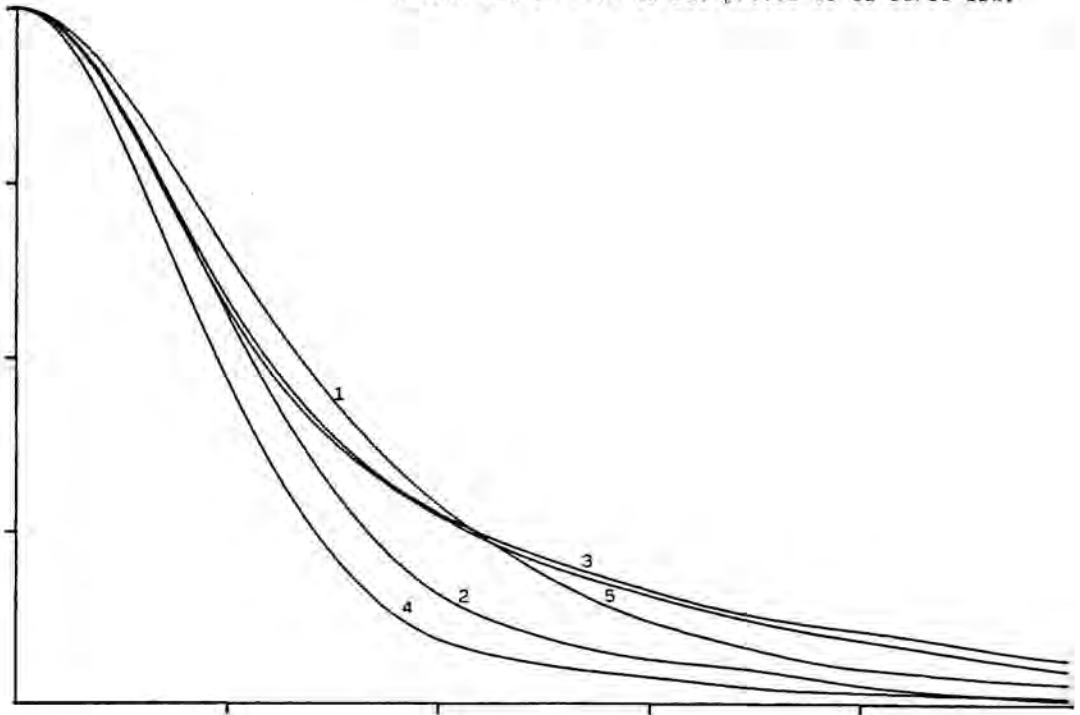
9.2.1. Proves en eix.

Els resultats per a la sèrie EDG són els següents

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 es presenten a la figura 9-2.

FIGURA 9-2 .- MFTP de les proves de la sèrie EDG.



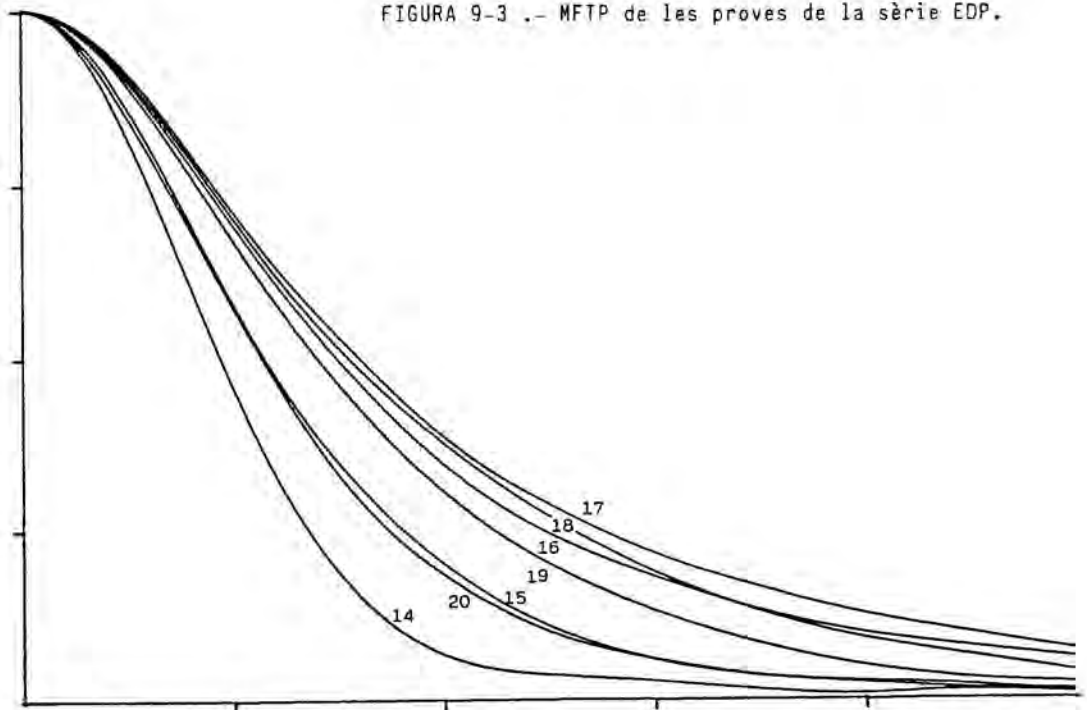
Tant pels observadors com pels criteris considerats, les proves 01 i 03 són de qualitat molt semblant.

Resulta molt significatiu que els criteris QA3 i QA4 inverteixin la valoració de les proves 01 i 05 respecte als altres i a tots els observadors. Això cal atribuir-ho al pes que aquests criteris atorguen a les altes freqüències al mateix temps que no eliminen l'intervenció de les "cues" de les corbes del MFTP.

Per a la sèrie EDP tots els criteris de qualitat generen una mateixa ordenació, canviant solament el valor relatiu de qualitat, el qual influirà en les ordenacions conjuntes. A més la coincidència és quasi total amb els observadors (excepte Obs3).

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

Les corbes de MFTP són molt semblants, per això hi ha gran coincidència entre tots els criteris de qualitat i entre tots els observadors.



Per a tota la sèrie EIX els resultats es resumeixen en la taula següent

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

Les diferències sorgeixen, bàsicament, en les ordenacions de les proves 03, 19, 05 i 01, per part dels criteris QA4, QA5 i QV1. Tenint en compte la forma de les corbes del MFTP corresponents, cal atribuir les diferències a l'efecte de les cues de la funció de transmissió.

Comparant les ordenacions dels criteris amb les dels observadors, es poden treure algunes conclusions:

- tots els observadors donen com millor la prova 02 respecte a la 20 i, en canvi, cap criteri de qualitat ho fa. Els criteris que assignen valors de qualitat més semblants són QA1 i QA6.

- solament els criteris QA4, QA5 i QV1 originen ordenacions que presenten divergències significatives respecte als observadors, com per exemple la permutació entre 01 i 05.

9.2.2. Proves en camp.

Tal com s'ha comentat al capítol 7, per a l'aplicació dels criteris d'àrea s'ha utilitzat la funció obtinguda per amitjanament, per a totes les orientacions en el pla de les freqüències, dels valors del MFTP bidimensional.

Per a la sèrie CDG es té

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	11 8.81	08 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

Per a la sèrie CDP resulta

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

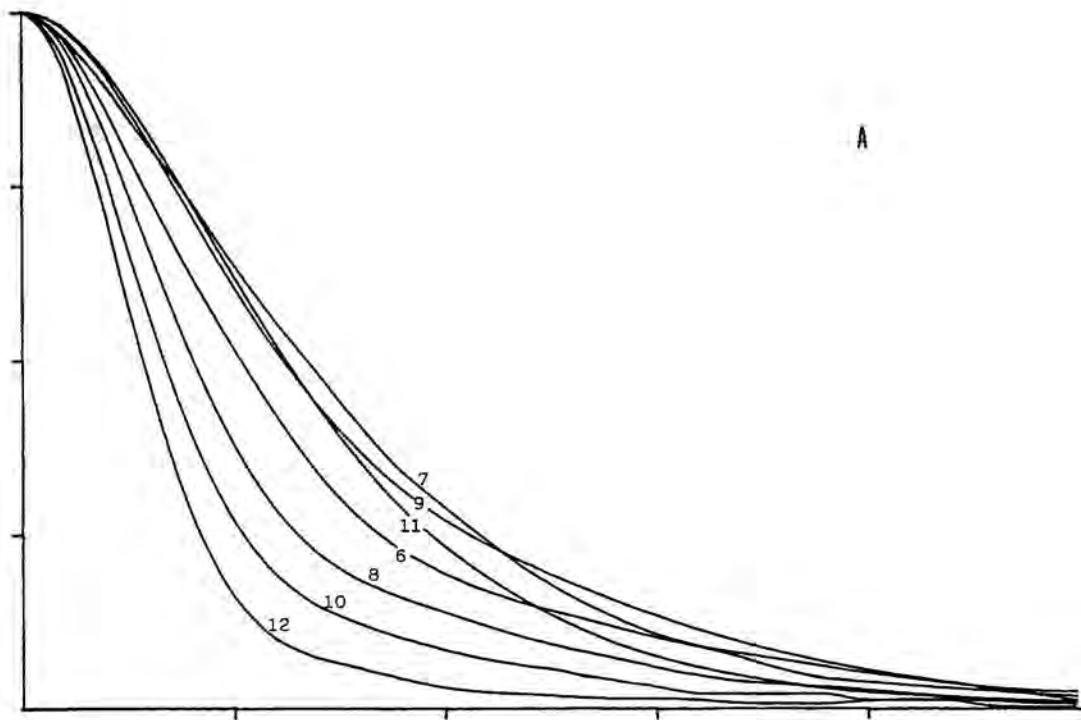
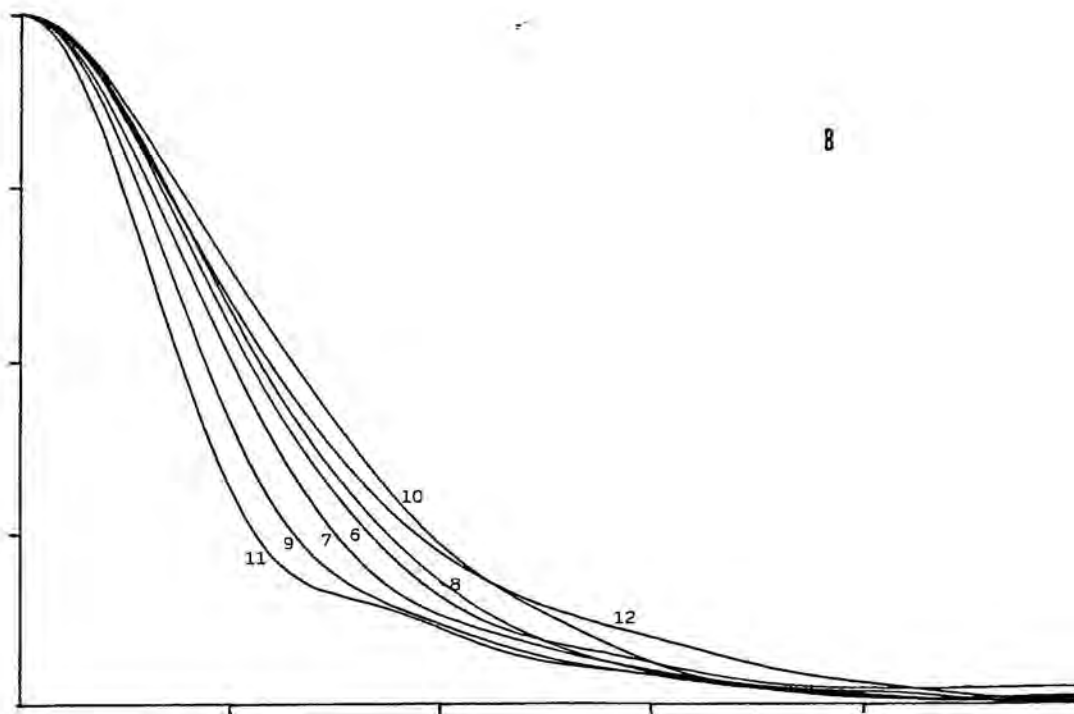


FIGURA 9-4 .- MFTP de les proves de la sèrie CDG: (A) tangencial, (B) sagital.



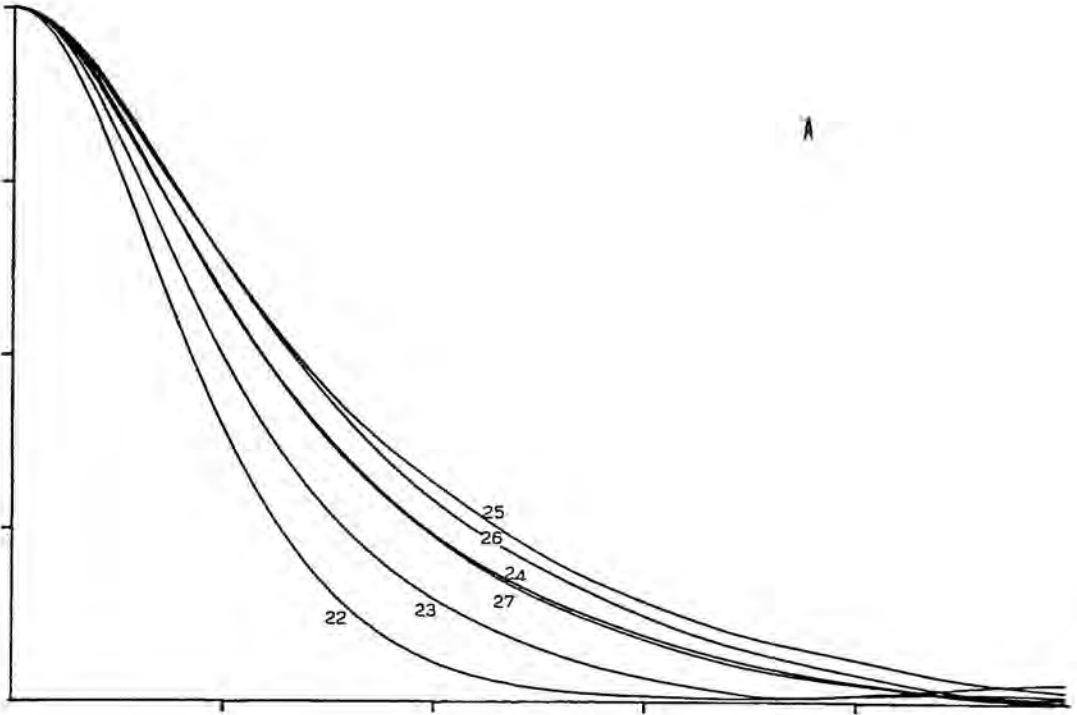
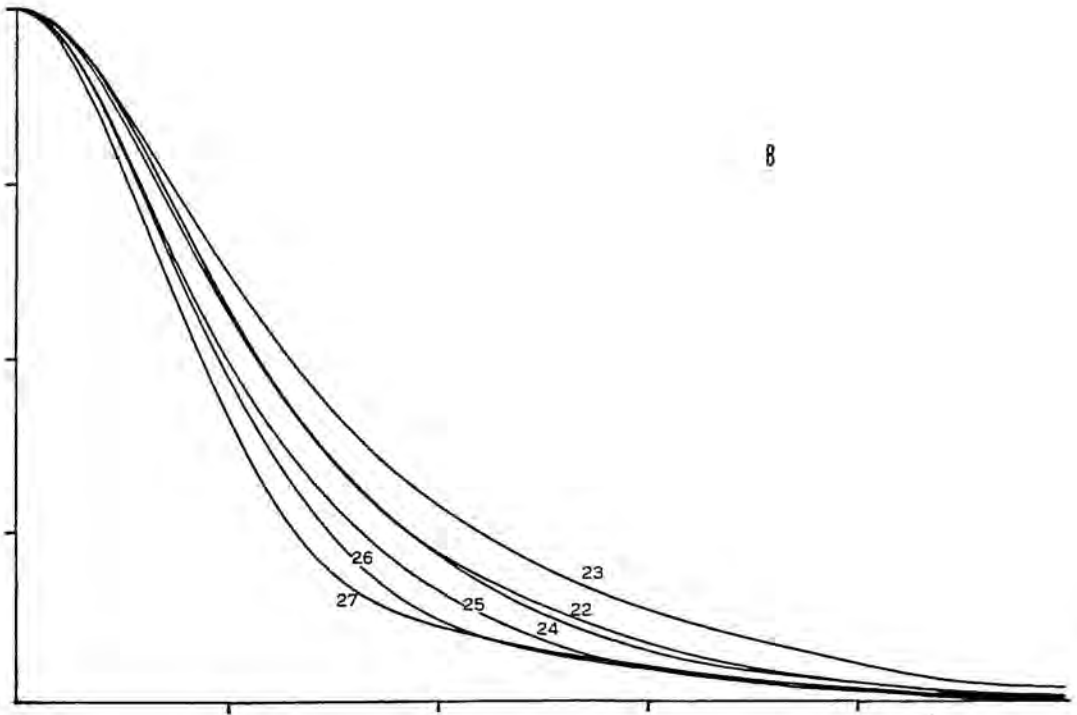


FIGURA 9-5 .- MFTP de les proves de al sèrie COP: (A) tangencial, (B) sagital.



En les ordenacions de la sèrie CDG, la principal diferència està en la total inversió entre les proves 06 i 07, per part dels observadors i dels criteris de qualitat. A més, el QV1 dona millor la 11 que la 08, en desacord amb tots els observadors.

Respecte a la sèrie CDP, la coincidència és quasi total, solament els criteris QA4 i QA5 permuten les proves 24 i 25, en total desacord amb tots els observadors.

Els resultats de la sèrie CAMP són

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

Tots els criteris de qualitat sobrevaloren la prova 07 respecte als observadors, ja que aquests consideren millors que ella la 20 i la 06. També queda sobrevalorada la 09 i, en canvi, la 22 es considerada pitjor del que indiquen els observadors.

Apart d'aquestes diferències generals, és clar que el criteri QV1 resulta inadequat, ja que dona 06 millor que 23

i 26, cosa que no concorda amb cap observador, subvalora al mínim la 22, col·loca la 11 sobre la 08, etc. L'origen d'aquests resultats està en la gran influència de les cues del MFTP en el càlcul dels volums que delimita i el poc efecte que tenen en la qualitat d'imatge.

9.2.3. Ordenacions totals.

Tots els criteris, en conjunt, sobrevaloren la qualitat de la prova 07 i subvaloren la de les proves 02, 22 i 04.

Aquest fet pot considerar-se una limitació en les possibilitats d'utilització pràctica d'aquests criteris de qualitat, però s'ha de tenir en compte, també, que el nombre de proves considerat és gran (25 en total) i que les discordàncies sorgeixen sempre en proves de qualitat mitjana. És a dir, si ens restringim a les millors (una dotzena), pràcticament no hi ha problemes en la valoració per part dels criteris de qualitat.

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 coincidents amb les dels observadors. Es poden qualificar els tres criteris de qualitat com acceptables i equivalents entre si.

Els criteris QA4 i QA5 són equivalents entre si, però menys coincidents amb els observadors.

El criteri QA6 origina ordenacions similars al les dels observadors, lleugerament menys coincidents que els criteris QA1, QA2 i QA3 en zones de qualitat mitjana.

El criteri QV1 cal considerar-lo inacceptable, doncs a més de les diferències comunes a tots, presenta divergències bastant importants.

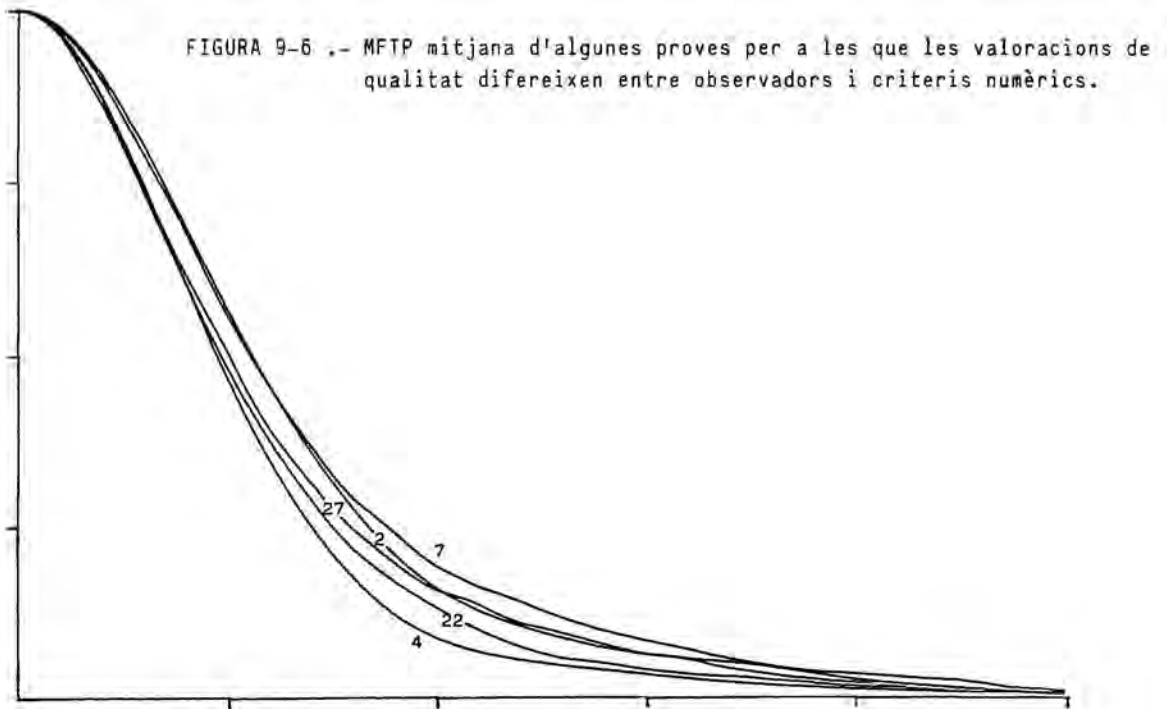
El criteri QV2 és correcte, de manera similar a QA6 i, per tant, a QA1, QA2 i QA3. Tal com s'ha vist, QV2 coincideix amb QA5 en el cas en que el MFTP tingui simetria de revolució, amb la única diferència de la eliminació dels valors molt baixos del MFTP a altes freqüències al calcular el volum. Per tant, el fet de que un criteri resulti acceptable i l'altre no demostra la conveniència de despreciar la contribució de valors del MFTP inferiors al mínim visible retinèa en la formació de la imatge final.

La qualificació de criteri acceptable o inacceptable és, en tot el d'abans, relativa. Efectivament, el que s'ha fet ha sigut deixar de banda les diferències que apareixen per a tots els criteris i analitzar solament les coincidències amb els observadors de les proves restants. D'aquesta manera si un criteri funciona bé per a la gran majoria d'aquestes proves es considera acceptable. Si hi ha diferències notables respecte als observadors en la seva valoració, el criteri es considera inadequat.

9.2.4. Principals divergències entre criteris i observadors.

Les corbes mitjanes del MFTP de les proves amb més gran discordància entre els criteris de qualitat i els observadors es presenten a la figura 9-6.

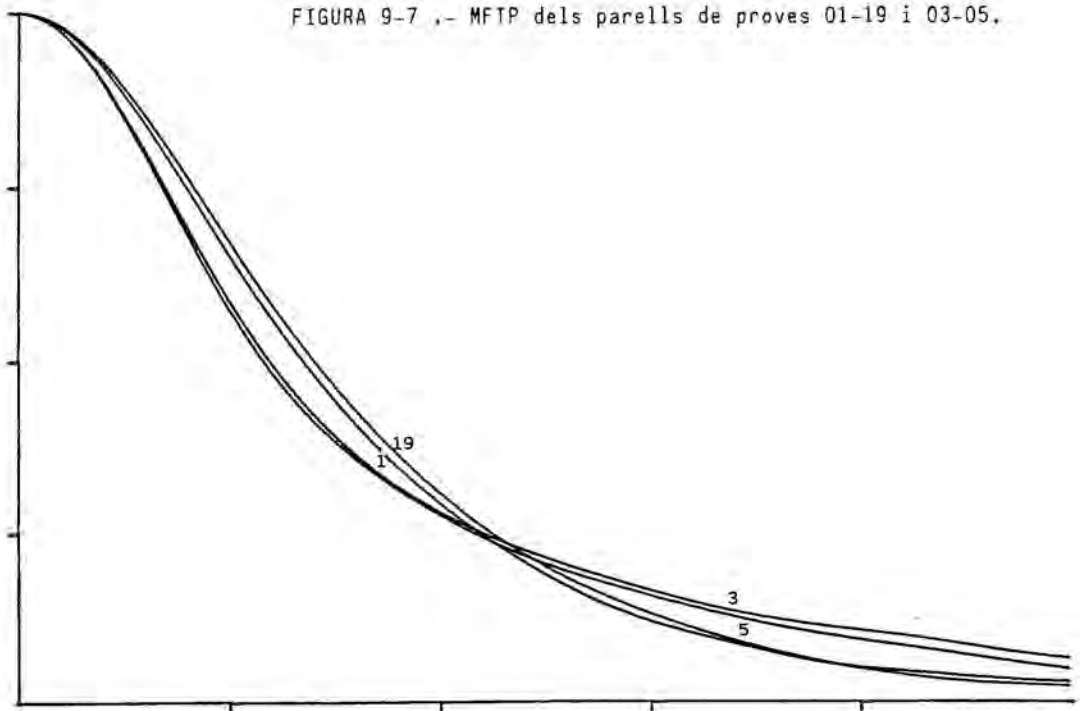
Les ordenacions establertes pels criteris de qualitat coincideixen amb les que es poden establir directament de la observació de la figura (07, 02, 27, 22, 04). En canvi, els observadors determinen majoritàriament una ordenació 02, 07, 04, 27, 22. La prova 27 sols es presenta com a referència, les altres quatre són les més discordants, sobre tot la 07 i la 04, com es pot comprovar comparant les taules d'ordenacions dels observadors i dels criteris de qualitat presentades anteriorment.



9.3. CONTRAST O RESOLUCIÓ?

Una de les qüestions que es volia aclarir amb la realització del present treball és la de la comparació de proves obtingudes en condicions tals que la seva qualitat fos similar però amb la diferència que en un cas predominés el millor contrast a baixes freqüències i en l'altre la millor resolució. Aquest és el cas que es presenta en la comparació de les proves 01, 03, 05 i 19. Les corbes del MFTP corresponents es mostren a la figura 9-7.

És molt significatiu, des del punt de vista de la precisió de les mesures, que tots els observadors coincideixin al valorar 19 millor que 01 i 03 millor que 05, malgrat la poca diferència entre les corbes del MFTP respectives. Això



suggereix que aquesta petita diferència existeix realment. En canvi, al fer la comparació entre la 01 i la 03, és a dir els dos tipus de corba, sorgeixen les discrepàncies entre els observadors pel fet de haver de valorar característiques diferents a les dues imatges.

10.
CONCLUSIONS.

1)

S'han estudiat les condicions de validesa de les tècniques d'anàlisi de sistemes lineals pel procés fotogràfic en color, desenvolupant-se un mètode amb pel·lícula invertible que garanteix la linealitat per a un ample marge de intensitats d'entrada.

2)

S'ha posat a punt un microdensitòmetre unidimensional, adequant la seva resposta espectral a la de l'ull humà en visió fotogràfica. S'ha desenvolupat un sistema de mesura microdensitomètrica de gran precisió, capaç de cobrir la zona de freqüències espacials present en una imatge enregistrada en pel·lícula comercial (fins a 80 l/mm).

3)

S'han comparat dos mètodes de mesura del MFTP: per anàlisi de la imatge d'una escletxa i per contrast de la imatge d'un test sinusoïdal. Es conclou que per a mesures precises a altes freqüències cal disposar d'un test sinusoïdal amb suficient nombre de períodes per a que es minimitzin els efectes de vores. En tot cas, per a una avaluació precisa de la funció MFTP per aquest mètode serien necessàries moltes mesures a moltes freqüències, pel qual s'aconsella preferentment el mètode d'anàlisi de la imatge d'una escletxa.

4)

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

5)

S'ha definit una sèrie de criteris de qualitat basats en el MFTP de l'instrument fotogràfic formador de la imatge, estudiant la seva adequació pràctica en el camp d'aplicació de la fotografia en color de tipus comercial.

6)

S'han estudiat diversos mètodes per a caracteritzar el procés de al 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.

7)

En treballs anteriors del departament, 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'elles (per a sistemes de baixa qualitat). S'ha comprovat la validesa del resultat en el cas de sistemes de bona qualitat.

8)

En zona d'eix constitueixen criteris de qualitat acceptables i de resultats 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 retineà.

9)

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 $10^{u/u_c}$, 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 retineà.

10)

Per a trobar el factor de ponderació entre la 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 volumic és satisfactori.

11)

L'avaluació del volum sota la superfície del MFTP bidimensional s'ha fet amb la suposició addicional de 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.

12)

Per a definir una MFTP única del sistema en zones de camp es proposa la funció obtenida 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.

8.

11.

BIBLIOGRAFIA.

- Arecchi, F. T. et al., "A simple inexpensive MTF meter". *Optica Acta* 27, 1263 (1980).
- Artishevskii, V. I. & Chalova, V. A., "The determination of the image contrast in optophotographic systems at their resolution limit". *Sov. J. Opt. Technol.* 42, 299 (1975).
- Artishevskii, V. I. & Gradoboev, V. M., "Standard targets for determining the photographic resolution of objective lenses". *Sov. J. Opt. Technol.* 42, 672 (1975).
- Aver'yanova, M. A., "Method of determining the MTF's of photographic materials from the idealized edge response curve". *Sov. J. Opt. Technol.* 43, 181 (1976).
- Aver'yanova, M. A. & Pruss, P. K., "The location of the midpoint of the edge response curve in the presence of development microeffects". *Sov. J. Opt. Technol.* 44, 268 (1977).
- Aznarez, J. et al., "Contribution à la détermination des fonctions transfert par la méthode du bord de plage". *Optica Acta* 21, 809 (1974).
- Baker, L. R., "Status of OTF in 1970". *Optica Acta* 18, 81 (1971).
- Barnden, R., "Calculation of axial polichromatic optical transfer function". *Optica Acta* 21, 981 (1974).
- Barnden, R., "Extra-axial polichromatic optical transfer function". *Optica Acta* 23, 1 (1976).

Barandalla, J. J., Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. (1973)

Barton, N. P., "Application of the optical transfer function to visual instruments". *Optica Acta* 19, 473 (1972).

Basuray, A. et al., "A new method for edge image analysis". *Optica Acta* 26, 349 (1979).

Berger-Lheureux-Robardey, M. S. "Mesure de la fonction de transfert de modulation du système optique de l'œil et des seuils de modulation rétinien". *Revue d'Optique* 44, 294 (1965).

Biedermann, K. & Johansson, S.. "Development effects and the MTF of high-resolution photographic materials for holography". *J. Opt. Soc. Am.* 64, 862 (1974).

Bigelmaier, A. et al., "An instrument for measuring transfer functions and lines spread functions of camera lenses". *Appl. Opt.* 7, 277 (1968).

Brigham, E. O., "The fast Fourier transform". Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

British Standards Institution, "Recommendations for measurement of optical transfer function of optical devices". BS 4779: 1971 (London: B. S. I.)

Brock, G. C. et al., "OTF standards for aerial mapping lenses". *Optica Acta* 19, 953 (1972).

- Consitt, F. J. P. & Mandler, W., "OTF techniques in the routine testing of production lenses". *Optica Acta* 18, 123 (1971).
- Cooley, J. W. & Tukey, J. W., "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series". *Math. Comp.* 19, 291 (1965)
- Dainty, J. C., "Methods of measuring the modulation transfer function of photographic emulsions". *Optica Acta* 18, 795 (1971).
- DePalma, J. J. & Lowry, E. M., "Sine wave of the visual system. II sine wave and square wave contrast sensitivity". *J. Opt. Soc. Am.* 52, 328 (1962).
- Dudnikov, Yu. A., "Photographic resolution and modulation transfer function of systems comprising fly's-eye lenslet and a photographic emulsion". *Sov. J. Opt. Technol.* 39, 602 (1972).
- Duffieux, P. M., "L'integrale de Fourier et ses applications à l'optique", S.A. des imprimeries Oberthur, Rennes (1946).
- Dutton, D., "Procedure for over-all lens evaluation using OTF data". *Appl. Opt.* 11, 1091 (1972).
- Ealing Eros system of OTF measurement (catálogo).
- EMI Electronics Ltd. "Photomultipliers" (catálogo) (1982).
- Felstead, E. B. et al., "One dimensional optical Fourier transforms of line tracings". *Optica Acta* 21, 85 (1974).
- Françon, M. "Optique. Formation et traitement des images". Masson et Cie, Editeurs. Paris (1972).

Frieser, H., Z. wiss. Photograph., 37, 261 (1938).

Fry, G. A., "The optical performance of the human eye". Progress in Optics 8, 51, North-Holland Publishing Company, Amsterdam (1970).

Fry, G. A., "The eye and vision". App. Opt. & Opt. Eng., 2, 2, Academic Press, New York (1965).

Gennery, D. B., "Determination of optical transfer function by inspection of frequency-domain plot". J. Opt. Soc. Am. 63, 1571 (1973).

Green, A. E. S. & McPeters, R. D., "New analytic expressions of photographic characteristic curves". Appl. Opt. 14, 271 (1975).

Goodman, J. W., "Introduction a l'optique de Fourier et a l'holographie". Masson et Cie, Editeurs. Paris (1972).

Grimes, D. N., "Linear microdensitometry". J. Opt. Soc. Am. 61, 1263 (1971).

Grover, C. P. & Driel, H. M., "Autocorrelation method for measuring the transfer function of optical systems". Appl. Opt. 19, 900 (1980).

Heidinger, D., et al., "Simple method of describing the photographic image quality". Optica Acta 24, 617 (1977).

Hopkins, R. E. & Dutton, D., "Interlaboratory comparisons of MTF measurements and computations on large wide-angle lens". Optica Acta 18, 105 (1971).

Hopkins, H. H., "The application of frequency response techniques in optics". Proc. Phys. Soc. 79, 889 (1962).

Ichioaka, Y. & Suzuki, T., "Assessment of image quality of optical systems". Appl. Opt. 7, 972 (1968).

Jaiswal, A. K., "Measurement of OTF using a triangular wave test grating". Appl. Opt. 12, 2248 (1973).

Jaiswal, A. K. & Bhogra, R. K., "Effects of target contrast and background upon tribar threshold and resolution". Appl. Opt. 15, 504 (1976).

Johansson, S. & Predko, K., "A method for MTF evaluation from the image of a variable slit". Optica Acta 23, 594 (1976).

Juvells, I. et al. "Numerical evaluation of the two-dimensional modulation transfer function by means of spot diagram. Comparison with experimental measurements". J. Optics 14, 293 (1983).

Kelly, D. H., "Visual contrast sensitivity". Optica Acta 24, 107 (1977).

Kinzly, R. E., "Partially coherent imaging in microdensitometer". J. Opt. Soc. Am. 62, 386 (1972).

Kodak, publicaciones: P-315, E-77, E-39, E-59, etc.

Kondo, H. et al., "Criteria for the evaluation of photographic lenses". Optica Acta 22, 353 (1975).

Kowaliski, P., "Théorie photographique appliquée". Masson et Cie, Editeurs. Paris (1972).

Laing, R. A. & Oak, S. M., "Uniformity of film development resulting from different processing techniques". Appl. Opt. 15, 1276 (1976).

Lauroesch, T. J. et al., "Threshold modulation curves for photographic films". Appl. Opt. 9, 874 (1970).

Leach, B. A., "Ministry of Defence experience of introducing MTF into production testing of optical systems". Optica Acta 22, 375 (1975).

Levi, L., "Detector response and perfect-lens-MTF in polichromatic light". Appl. Opt. 8, 607 (1969).

Levi, L., "Vision in communication". Progress in Optics 8, 343. North-Holland Publishing Company, Amsterdam (1970).

Linfoot, E. H., "Fourier methods in optical image evaluation". Focal Press, London (1964).

Marchant, A. C., "Accuracy in image evaluation: setting up an OTF standards laboratory". Optica Acta 18, 133 (1971).

Marchant, A. C., "MTF-based criteria for air-camera lens specifications". Optica Acta 22, 347 (1975).

Matsui, Y. & Murata, K., "Comparison test of several OTF measuring equipments in Japan". Optica Acta 18, 149 (1971).

Meeteren, A., "Calculations on the optical modulation transfer function of the human eye for white light". *Optica Acta* 21, 395 (1974).

Moneo, J. R. de F. & Barandalla, J. J., "Aplicación de la FDT a la determinación de la calidad de imágenes fotográficas: II) Criterios de calidad". *Rev. Acad. Ciencias de Zaragoza* 29, 373 (1974).

Moneo, J. R. de F. & Barandalla, J. J., "Truncated sinusoidal test and experimental measurement of MTF". *Atti della Fondazione Giorgio Ronchi* 32, 800 (1977).

Murata, K., "Instruments for measuring of optical transfer functions". *Progress in Optics* 5, 201, North-Holland Publishing Company, Amsterdam (1967).

Navajas, D., Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona (1980).

Navajas, D. et al., "Evaluation of polichromatic image quality by means of transfer function". *J. Optics* 13, 283 (1982).

Newland, D.E., "Random vibrations and spectral analysis". Longman Group Ltd. London (1975).

Nill, N. B., "Scene power spectra: the moment as an image quality merit factor". *Appl. Opt.* 15, 2846 (1976).

Ooue, S., "The photographic image". *Progress in Optics* 7, 301. North-Holland Publishing Company, Amsterdam (1969).

- Ostrovskaya, M. A., "The modulation transfer function (MTF) of the eye". Sov. J. Opt. Technol. 36, 132 (1969).
- Overington, I. & Gullick, S. A., "Evaluation of a total system-optics plus operator". Optica Acta 20, 49 (1973).
- Overington, I., "Some considerations of the role of the eye as a component of an imaging system". Optica Acta 22, 365 (1975).
- Papoulis, A., "Systems and transforms with applications in optics". McGraw-Hill, New York (1968).
- Petukhov, B. V., "Calculations of the resolution of photographic systems". Sov. J. Opt. Technol. 42, 560 (1975).
- Perrin, F. H., "The photographic emulsion". App. Opt. & Opt. Eng. 2, 120, Academic Press, New York (1965).
- Ray, S., "The lens in action". Focal Press, London (1976).
- Ray, S., "The lens & all its jobs". Focal Press, London (1977).
- RCA Electronic Components, "Photomultiplier manual". Technical Series PT-61 (1970).
- Reynolds, G. O. & Smith, A. E., "Experimental demonstration of coherence effects and linearity in microdensitometry". Appl. Opt. 12, 1259 (1973).
- Roetling, P. G. et al., "Theoretical prediction of image quality". J. Opt. Soc. Am. 58, 342 (1968).

Rosenbruch, K. J., "Use of OTF-based criteria in automatic optical design". *Optica Acta* 22, 291 (1975).

Rosenhauer, K. & Rosenbruch, K., "Flare and optical transfer function". *Appl. Opt.* 7, 283 (1968).

Selwyn, E. W. H., "Combination of lens and film". *App. Opt. & Opt. Eng.* 2, 165, Academic Press, New York (1965).

Swing, R. E., "Conditions for microdensitometer linearity". *J. Opt. Soc. Am.* 62, 199 (1972).

Takeda, M. & Ose, T., "Effect of truncation of noisy line spread function on the computed optical transfer function". *Optica Acta* 21, 477 (1974).

Takeda, M. & Ose, T., "Influence of noise on the measurement of optical transfer functions by the digital Fourier-transform method". *J. Opt. Soc. Am.* 65, 502 (1975).

Takeda, M., "Chromatic aberration matching of the polichromatic optical transfer function". *Appl. Opt.* 20, 684 (1981).

Vallmitjana, S., Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona (1980).

Vallmitjana, S. et al., "A simple method of evaluating the polichromatic modulation transfer function for photographic systems". *J. Optics* 14, 25 (1983).

Wittenstein, W. et al., "The definition of the OTF and the measurement of aliasing for sampled imaging systems". *Optica Acta* 29, 41 (1982)