Projecte final de carrera

Disseny d'un colorímetre de baix cost

per

Abel Plana Planagumà

Universitat Politècnica de Catalunya

Ponent del projecte: Ramón Alcubilla González
Director del projecte: Óscar Martínez Bailac

Novembre 2008

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
de Telecomunicació de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

FULL NÚMERO 1
CURS: .....

a) A complimentar per l'estudiant:

Dades de l'estudiant:

COGNOMS: .....
NOM: .....

TITULACIÓ: .....
ESPECIALITAT (si escau): .....
PLA D'ESTUDIS: .....

Dades del Projecte de Fi de Carrera:

TÍTOL: .....
.....
.....

PARAULES CLAU: .....
.....
.....

RESUM: .....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

DIRECTOR/A/S/ES: .....

PONENT (si escau): .....

Paper ecológic

1. INTRODUCCIÓ 3

1.1 DESCRIPCIÓ DEL PROBLEMA 3
1.2 INSTRUMENT DE REFERÈNCIA 9
1.3 TEORIA DE LA MESURA DE COLOR 10
1.3.1 Percepció del color 10
1.3.2 Espais de Color 13
1.3.3 Diferències de color 16
1.4 OBJECTIUS 20

2. ESTAT DE L'ART 21

3. RESULTATS 23

3.1 PLA DE TREBALL 23
3.2 CALIBRACIÓ 23
3.3 MESURA 27
3.4 ENTRENADOR 28
3.5 CONVERSOR ANALÒGIC DIGITAL 30
3.6 MÈTODES MATEMÀTICS 31
3.6.1 Aproximació per polinomis arbitraris 31
3.6.2 Aproximació per extrapolació de gràfics 34
3.6.3 Mètode Moore Penrose (Matriu pseudoinversa) 38
3.7 COLORÍMETRES AMB DIFERENT NÚMERO D'IL·LUMINATS 42
3.7.1 Colorímetre amb un il·luminant 42
3.7.2 Colorímetre amb dos il·luminats 43
3.7.3 Colorímetre amb tres il·luminats 45
3.7.4 Colorímetre amb quatre il·luminants 46
3.7.5 Observació de resultats 49
3.8 MODEL DEFINITIU 52
3.9 VERIFICACIÓ DEL MODEL 55

4. CONCLUSIONS 56

5. BIBLIOGRAFIA 58

A. ANNEX I – GLOSSARI 60

B. ANNEX II – CÀLCULS 62

B.1. CÀLCUL XYZ 62
B.2. CONVERSIÓ D'ESPAI CIE1931 (XYZ) A CIE XYY (XYZ Y) 64
B.3. CONVERSIÓ D'ESPAI CIE XYY A CIE 1931 (XYZ) 65
B.4. CONVERSIÓ D'ESPAI XYZ A CIELAB 66
B.5. CONVERSIÓ D'ESPAI CIELAB A CIELCH 68
B.6. CÀLCUL DE DE76 69
B.7. CÀLCUL CMC L:C 70
B.8. CÀLCUL DE94 71
B.9. CÀLCUL DE DE2K 72

1. Introducció

En aquesta part del projecte es dóna la informació per comprendre el projecte, es descriu el problema existent i es proposen els objectius a assolir.

Per tal de millorar i mantenir la qualitat dels productes de l'empresa a on es desenvolupa el present projecte, es vol crear un colorímetre, per introduir-lo en els productes (de gamma alta) que genera. En un primer moment, es va estudiar integrar un instrument professional al producte, però degut al cost elevat d'aquests, que oscil·len entre els 600 i els 4000 euros, es va desastimar fer-ho. És per aquesta raó que sorgeix la necessitat d'elaborar un colorímetre personalitzat pel producte que l'empresa produeix. En els següents apartats es descriu detalladament el procés per dur a terme el present projecte.

1.1 Descripció del problema

Un bon **colorímetre** professional té un cost elevat, com hem dit abans el preu pot oscil·lar entre 600 euros i els 4000 euros. L'empresa a on es dessenvolupa l'instrument, vol dissenyar-ne un d'uns 10 euros aproximadament (només cost de materials).

> *Què és un **colorímetre**?*
>
> *És un instrument de mesura de color. Mesura el color de la superfície, aquest dóna uns paràmetres estàndards coneguts internacionalment, de manera que una altra persona podrà reproduir el mateix color tenint aquesta mesura i la seva configuració. Aquests valors estàndards són: els tres estímuls X, Y i Z, o els paràmetres L*, a* i b* o els L*, c* i h* (s'expliquen més endavant).*

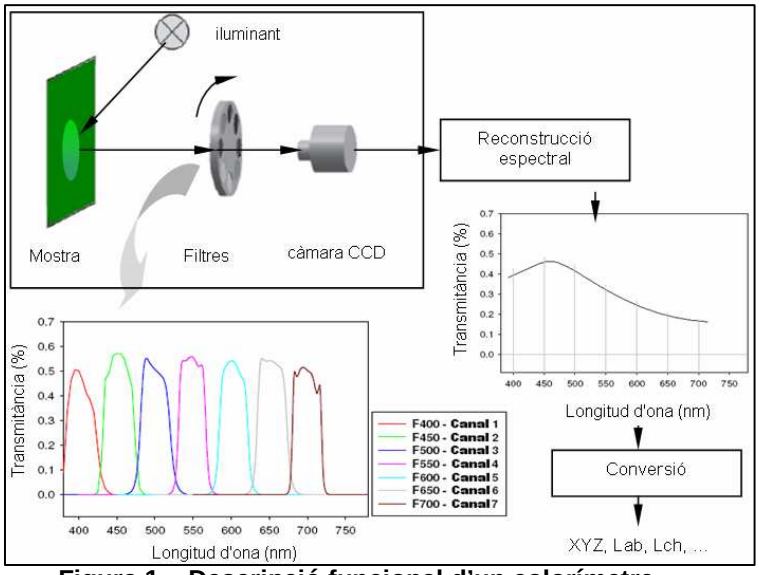


Figura 1 – Descripció funcional d'un colorímetre

En el nostre cas es pretén que l'instrument final estigui estandaritzat a una font de llum concreta: D50, a 2 graus i any CIE[1] 1964.
D50 és el tipus de llum, té un espectre[2] concret, definit i internacionalment conegut.

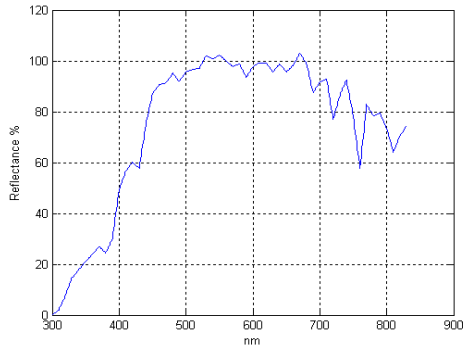


Figura 2 – Espectre de l'il·luminat D50

2 Graus de la perpendicular de la superfície a mesurar (és des d'on es va mesurar l'espectre proporcionat).També existeix a 10º però que no s'utilitza en aquesta projecte. La font de llum estarà a 45º.

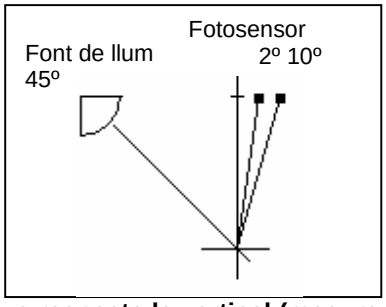


Figura 3 – Graus respecte la vertical (mesura de l'il·luminat)

CIE1964 any en que es va redefinir aquest il·luminant, hi ha també el CIE1931 (primera vegada que es defineix l'il·luminat D50), difereixen poc, però el de 1964 és més precís.

Què són els tres estímuls X, Y i Z[3]?

Els tres estímuls són, com el seu nom indica, estímuls que l'ull humà percep per unes longitud d'ones concretes dins l'espectre

[1] CIE, en anglès, International Commission on Illumination, "Comissió internacionál d'il·luminació" neix al 1931, data en què es comencen a crear regles colorimètriques i que s'han anat actualitzant fins a l'actualitat.
[2] Un **espectre** és la descomposició d'una radiació electromagnètica en els seus components en termes de freqüència, energia dels fotons o de la longitud d'ona associada.
[3] Pel càlcul dels tres estímuls XYZ observi l'Annex II – Càlcul XYZ.

visible. Òpticament, són el resultat d'aplicar uns determinats filtres a l'espectre a mesurar, aquest filtres simulen la mateixa sensibilitat de l'ull humà. El valor X dóna la quantitat de vermell de l'espectre que s'està mesurant, el valor Y dóna la quantitat de verd de l'espectre que s'està mesurant i el valor Z dóna la quantitat de blau de l'espectre que s'està mesurant.

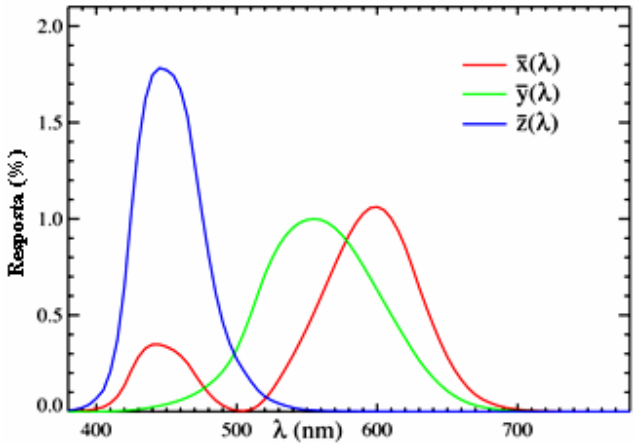


Figura 4 – Filtres tres estímuls xyz (CIE1931)

L'empresa porporciona com a instrument, un densitòmetre no calibrat de quatre canals. Els termes "no calibrat" signifiquen que l'instrument dóna valors sense cap referència ni estandardització; per tant les mesures realitzades amb l'instrument proporcionat caldrà que es comparin amb les mostres extretes d'un instrument professional, utilitzant el mateix patró (observi la part pla de treball i objectius per aclarir idees).

*Què és un **densitòmetre**?*

*És un instrument, que mesura la quantitat de llum emesa o els fluxos que emet, per una superfície que és il·luminada per una font de llum en un espai determinat. Dóna valors internacionalment coneguts, el CIEL*L*[4]*.*

Hi han dos tipus de densitòmetres:

A) De transmisió, mesuren materials transparents/translúcids

[4] CIE L*, paràmetre estandaritzat i internacionalment conegut, dóna un valor entre 0 (colors foscos/negres) i 100 (colors clars/blancs).

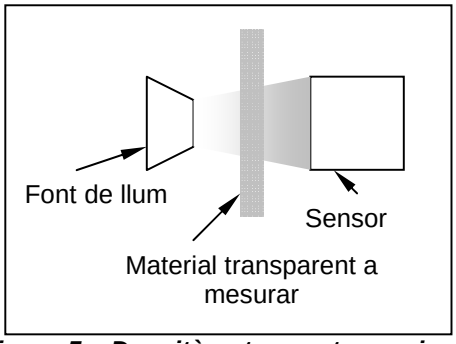


Figura 5 – Densitòmetre per transmissió

B) Reflexats, mesuren la llum reflexada d'una superfície.

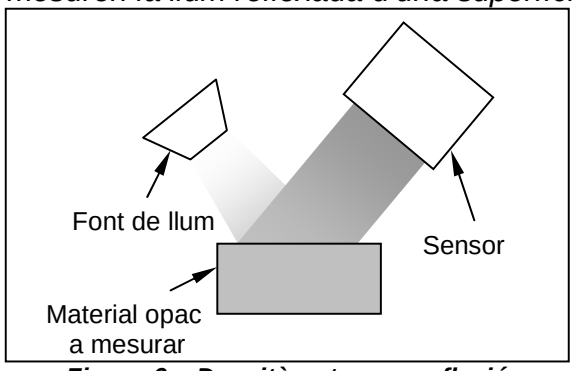


Figura 6 – Densitòmetre per reflexió

L'instrument proporcionat treballa per reflexió, emet una determinada llum i es mesura la quantitat de llum reflexada.

L'instrument proporcionat està format per quatre LEDs distribuïts espectralment parlant en tot el rang de llum visible, és a dir, des de 380nm fins a 730 nm. D'aquesta manera s'obtindran mesures de les zones blaves, verdes, grogues i vermelles.

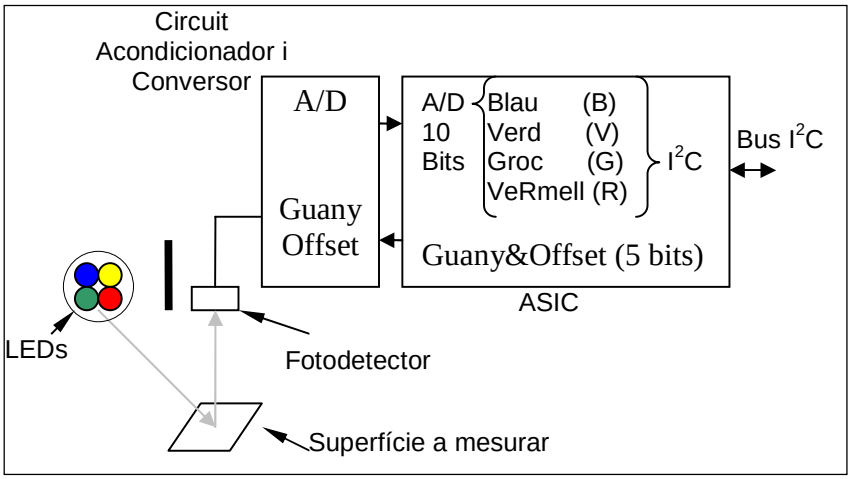


Figura 7 – Instrument de mesura proporcionat

A l'anterior figura es veu la descripció funcional del dispositiu. Cada superfície a mesurar s'haurà de mesurar quatre vegades, és a dir: una adquisició del convertidor analògic/digital (A/D) quan la superfície és il·luminada amb el LED blau, una adquisició del convertidor A/D quan la superfície és il·luminada amb el LED verd, una adquisició del convertidor A/D quan la superfície és il·luminada amb el LED groc i una adquisició del convertidor A/D quan la superfície és il·luminada amb el LED vermell.

Per simplificar:

- *CB = Comptes del sensor quan la superfície a mesurar s'il·lumina amb el LED Blau.*
- *CV = Comptes del sensor quan la superfície a mesurar s'il·lumina amb el LED Verd*
- *CG = Comptes del sensor quan la superfície a mesurar s'il·lumina amb el LED Groc.*
- *CR = Comptes del sensor quan la superfície a mesurar s'il·lumina amb el LED veRmell.*

L'instrument proporcionat disposa d'un ASIC on tindrà la informació per passar els valors CB, CV, CG i CR a valors estàndards i es transmeten les dades via I^2C[5]. Aquest ASIC permet captar directament les comptes del convertidor analògic/digital passant unes comandes via I^2C.

> *Què és un ASIC?*
>
> *En anglès, Application Specific Integrated Circtuit, "circuit integrat d'aplicació específica". Es refereix a circuits integrats fabricats expressament per una aplicació o producte, en comparació d'altres circuits dissenyats per ser usats en moltes aplicacions (com les CPUs o les memòries).*

Abans d'enviar la senyal al convertidor A/D, cal que sigui tractada. Per fer això es disposa d'un circuit condicionador a on es pot modificar el guany entre 0 i 4 (controlat per dos bits) i l'increment/decrement de tensió (l'anomenarem offset) que es pot variar amb 8 increments (3 bits de control). Aquests paràmetres (el guany i offset) poden ser canviats per l'usuari, també mitjançant les comandes adequades enviades per I^2C.

Resumint, el problema és que l'instrument proporcionat no està calibrat, ni tampoc conté cap mètode d'obtenció de paràmetres estàndards; per tant les dades adquirides del conversor A/D no tenen significat. En aquest punt

[5] I^2C, bus de comunicació estàndard que facilita la comunicació entre microcontroladors, memòries i altres dispositius amb cert nivell d'"inteligència", només requereix dues línies de comunicació: la senyal i un comú o massa. Fou dissenyada per Philips, permet l'intercanvi d'informació entre molts dispositius i pot treballar a diferents velocitats (d'uns 100 Kbits/s, fins a 3,4 MHz/s, depenent del rellotge que s'apliqui).

l'instrument no serveix per a res. A l'apartat d'objectius, s'explica com es pretén resoldre el problema. Cal afegir que l'instrument proporcionat té un cost de 6 euros i que el cost total del dispositiu haurà de ser d'uns 10 euros aproximadament.

1.2 Instrument de referència

L'instrument de referència s'ha escollit l'instrument més nou que es disposa al laboratori (menys derives en el temps) i que sigui de contacte[6] (per evitar que l'error produït en la posició vertical no influeixi en la mesura) i que la seva calibració sigui l'especificada, per obtenir un colorímetre amb aquestes mateixes característiques:

- Il·luminant: D50
- ANY CIE: 1964 (CIEYear)
- Graus CIE: 2º (CIEDegree)
- Filtre UV implícit.

Els valors extrets de l'instrument de referència es considereran ideals i serviran per modelar l'algoritme d'aquest projecte.

[6] Colorímetre de contacte: és un tipus d'instrument, que mesura el color i que ha d'estar en contacte amb la superfície a mesurar. Aquest tipus d'instruments fan que sempre hi hagi les mateixes condicions de contorn amb diferents mostres a mesurar (només es canvia la mostra), la distància entre la mostra i l'instrument sempre és la mateixa.

1.3 Teoria de la mesura de color

Es dóna la informació general sobre la llum i es descriu com els ulls dels humans percebem els colors.

1.3.1 Percepció del color

Com a breu introducció s'explica el funcionament òptic/físic de l'ull. Ens situem dins la retina a la part sensorial (la conversió d'òptica a impulsos elèctrics), a nivell microscòpic està formada per cons i bastons.

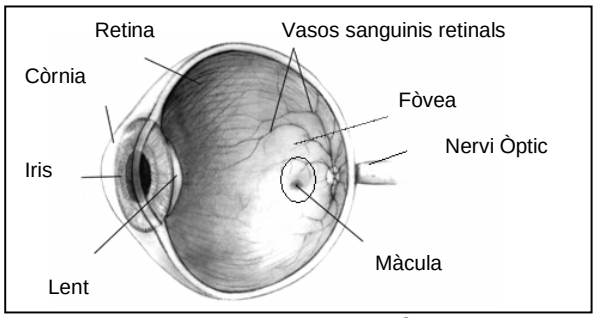


Figura 8– Ull Humà

Els **cons**, són cèl·lules fotosensores responsables de la visió en condicions d'alta lluminositat (visió fotòpica). Estan situats majoritàriament a la fòvea i segons ens allunyem de la retina central disminueixen en número. Es requereix molta llum perquè funcionin. Aquests codifiquen el color, és a dir, cada un d'ells presenta una resposta depenent de la longitud d'ona incident.

La **sensació de color** es produeix combinant els tres colors elementals (vermell, verd i blau). Cada con té una substància proteica diferent anomenades opsines. Estan sintonitzades per absorbir la llum d'una banda espectral concreta: l'eritropsina, que té una major sensibilitat per a les longituds d'ona llarga (llum vermella, l'anomenarem X), la cloropsina amb una major sensibilitat per a longituds d'ona mitjana (llum verda, l'anomenarem Y) i per últim la cianopsina amb major sensibilitat per a les longituds d'ona petites (llum blava, l'anomenarem Z). Aquestes cèl·lules estan connectades individualment amb altres fibres nervioses, de manera que els estímuls que arriben a cada una d'elles es reprodueixen al nervi òptic mitjançant impulsos elèctrics i aquest duu la informació al cervell a on es reconstruirà la informació per distingir els petits detalls o percebre els diferents colors.

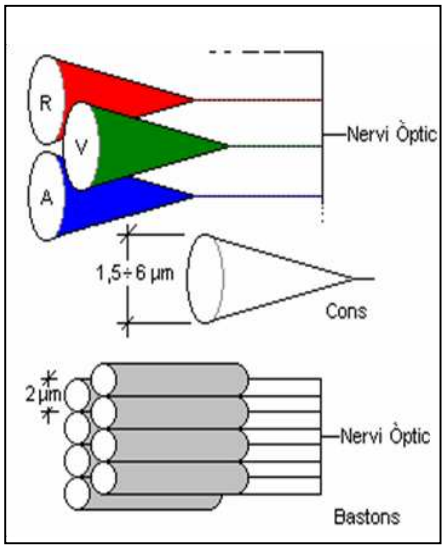


Figura 9 – cons i bastons

Els cons, com el seu nom indica, tenen forma cònica. Els segments interns tenen aproximadament 6 micròmetres de diàmetre, tot i que a nivell de fóvea aquest diàmetre pot arribar a reduir-se fins a 1,5 micròmetres. Els extrems dels cons són fogositats[7] per les cèl·lules de l'epiteli pigmentari[8] durant el dia, sobre tot a la vesprada, per tal de que es vagin renovant. Els cons necessiten uns mil fotons com a mínim per actuar, són molt menys sensibles que els bastons i són els responsables de la visió fotònica[9].

Els **bastons** són cèl·lules fotosensores responsables de la visió en condicions de baixa lluminositat, anomenada visió escotòpica[10]. Aquests presenten una elevada sensibilitat a la llum i se saturen amb condicions de molta il·luminació. S'ubiquen gairebé en tota la retina exceptuant a la fóvea. A diferència dels cons, contenen rodopsina, que és una proteïna que presenta una major sensibilitat a les longituds pròximes a 500 nm, és a dir la llum verda/blava, que és la responsable de la visió escotòpica).

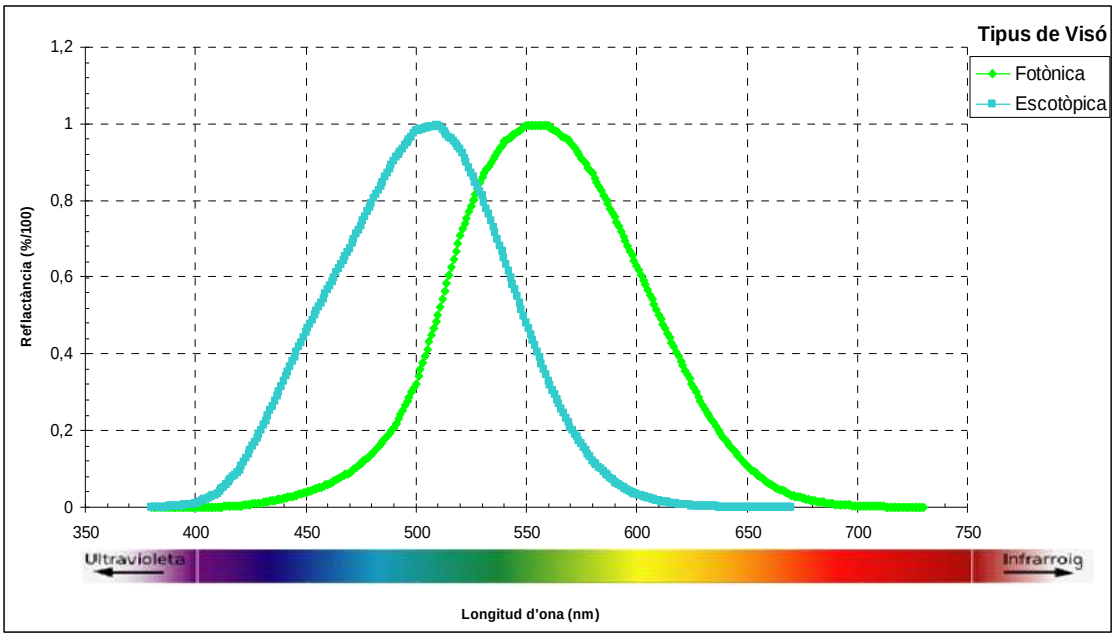


Figura 10 - Tipus de visió

[7] Fogositosi, canvi produit per un fotó sobre una cèl·lula, és com si una cèl·lula es cremés degut a la incidènica d'un fotó.
[8] Epiteli pigmentari és la capa retinal més pròxima a la coroide, aquesta està entre la capa més externa de l'ull (al voltant del nervi òptic) i la retina.
[9] Visió fotònica, tipus de visió que actua en condicions d'alta lluminositat ambiental i té una major sensibilitat en la zona de longituds d'ones pròximes als 555 nm (en la zona verdosa). En aquest tipus de visió els humans podem percebre els colors i els objectes en detall.
[10] La visió escotòpica és aquella percepció visual que es produeix amb nivells de molt baixa iluminació, en aquest tipus de visió no és possible una discriminació del color: és una visió monocromàtica, comprobi aquesta sensació en una habitació poc iluminada, veurà els objetes sense poder determinar el seu color.

Els bastons es connecten en grup i responen als estímuls que abasten una àrea general, però no tenen la capacitat per separar els petits detalls de la imatge visual. La diferent localització i estructura d'aquestes cèl·lules condueixen a la divisió del camp visual de l'ull en una petita regió central de gran agudesa visual. D'aquesta manera durant la nit els objectes confusos es poden veure per la part perifèrica de la retina quan són invisibles per la fòvea central. Són més prims que els cons, el diàmetre dels seus segments interns és aproximadament de 2 micròmetres. Són molt sensibles, capaços de detectar l'energia d'un sol fotó.

Ajuntant tota aquesta informació, podem observar que els ulls dels humans han desenvolupat dues maneres de percebre l'entorn. El primer cas, en condicions de lluminositat ambiental reduïda, poden percebre els objectes sense poder determinar el color, aquesta informació ens la dóna el conjunt de bastons distribuïts a la retina. I en l'altre cas, en condicions de lluminositat ambiental elevada, el conjunt de cons distribuïts a la fòvea ens dóna la percepció del color i ens permet distingir els petits detalls. Per poder respresentar d'una manera senzilla aquest tres estímuls, la comissió internacional en il·luminació (International Commission on Illumination, CIE) al 1931 va crear l'espai de color CIE1931 a on es representen els tres estímuls (produïts pels tres tipus de cons) X, Y i Z. Per a una major explicació dels espais de color, vegeu l'apartat següent: espais de color.

1.3.2 Espais de Color

Els espais de color utilitzats en aquest document són els espais CIE1931, el diagrama cromàtic CIE xy, l'espai de color CIE xyY, l'espai de color CIELab i el CIELch.

L'espai CIE1931, és un espai tridimensional cartesià on es representen els valors X, Y i Z. El problema que presenta aquest espai és que no és uniforme, a tall d'exemple: per petits increments en X, Y i Z en la zona de grocs pot haver-hi un canvi notable perceptivament parlant. En canvi, en la zona de blaus amb el mateix canvi que en l'anterior, podem no percebre cap canvi de color. Degut a que aquest espai no és uniforme sovint es canvia als espais Lab, o Lch entre altres.

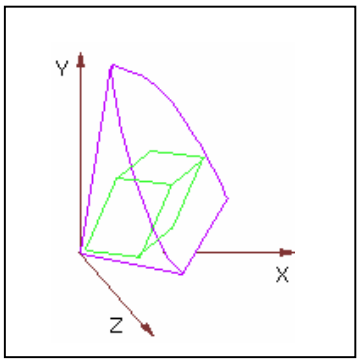


Figura 11 – Espai CIE1931 o espai XYZ

El concepte de color es pot dividir en dues parts: la lluminositat (Y), i el color (xy). El diagrama de color CIE xy, només té en compte el croma (és a dir, el color) la lluminositat, la Y, no es representa en aquest diagrama. Per exemple, el color blanc, és un color clar, mentre que el color gris es considera una versió menys lluminosa del mateix punt blanc de color xy, iguals que en l'anterior. En altres paraules, la cromaticitat del blanc i el gris es consideren iguals amb nivells de lluminositat diferents. Ajuntant el diagrama de color xy i la lluminositat Y, s'obté l'espai de color CIE xyY[11].

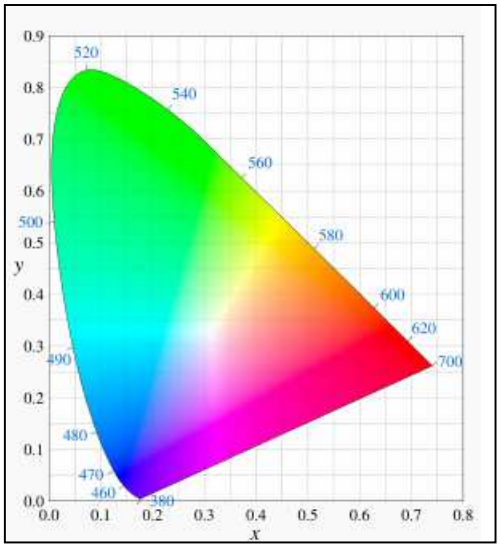


Figura 12 – Espai xyY

[11] Observi l'Annex II – Càlculs, a l'apartat conversió d'espai XYZ a xyY i viceverça.

En l'espai xy, observi en el gràfic anterior els nombres de color blau, són les diferents longitud d'ona (en nm) en funció del color que els humans percebem.

Degut a que aquest anteriors espais no són uniformes (per petites variacions en els valors XYZ o xyY, la percepció no és constant), es va canviar a l'espai de color CIELab (l'espai CIELab presenta una millora en aquest aspecte però no s'ha compensat del tot). A més d'aquest canvi, també té en compte l'il·luminat que s'està utilitzant per visualitzar el color (diguem que limita l'entorn, il·luminant la superfície a mesurar amb un il·luminant conegut, es coneix el seu espectra). És a dir, un mateix color pot presentar uns valors L a i b diferents, canviant tant sols l'il·luminat. Provi-ho amb un paper blanc quant és il·luminat amb un fluorescent o amb una llum incandescent, la percepció del color canvia notòriament. Aquest espai intenta evitar aquest problema, per tant les derives només seran degudes a la mostra a mesurar, eliminant les derives degut als diferents il·luminants i al fotosensor (això no és del tot cert, perquè les resposta del fotosensor no té perquè ser lineal amb totes les mostres, però es considera que una vegada l'instrument està calibrat, es pot considerar ideal).

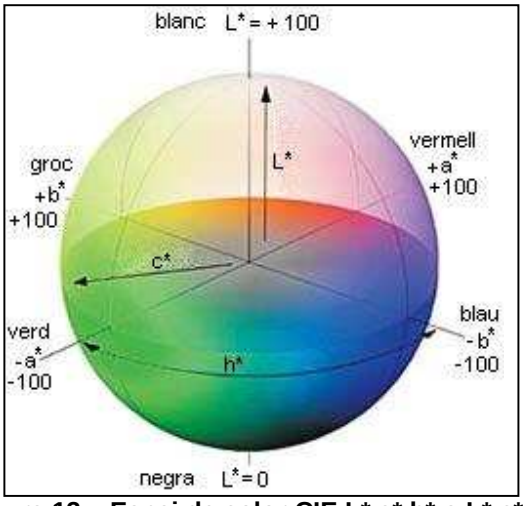


Figura 13 – Espai de color CIE L* a* b* o L* c* h*

Pel que fa a l'espai Lab, la L* ens dóna quanta il·luminació hi ha, el màxim és 100 i el mínim és 0, fa emblanquir o enfosquir, respectivament el color donat per a* i b*. La a* ens dóna si una mostra conté més verd com més negatiu sigui, fins a -100 o si la mostra conté més vermell com més positiu sigui, fins a +100. I la b* ens dóna si la mostra conté més groc com més positiu sigui, fins a +100 o si la mostra conté més blau com més negatiu sigui, fins a -100.

Pel que fa a l'espai Lch, que és el mateix que Lab, però en comptes de donar les coordenades cartesianes es dóna amb coordenades polars. La L* ens dóna quanta il·luminació hi ha, el màxim és 100 i el mínim és 0, fa emblanquir o enfosquir, respectivament el color donat per c* i h*, que és el mateix que la L* de l'espai Lab. La c* que és el mòdul de a* i b*, és el croma (la distància fins al punt

neutre – saturació, l'eix central a on a* i b* són 0) i el hue, que vol dir el matís en anglès, que és l'angle/direcció, se sol representar de 0 a 100% del total de 360º.

A l'Annex II es detallen els càlculs de cada conversió d'espai de color.

1.3.3 Diferències de color

Per determinar quantitativament parlant si un color és diferent d'un altre podem utilitzar varis mètodes de càlcul, per fer això la CIE s'ha inventat el dE.

> *Què és dE?*
>
> *Quan ens referim a dE ens referim al terme ΔE_{CIELab}. dE és un simple nombre que representa la "distància" entre dos colors o dues mostres. La idea és que 1 dE és la diferència de color més petita que l'ull humà pot percebre. Per tant qualsevol dE que sigui inferior a una unitat, l'ull humà no podrà percebre la diferència de color i per contra, per sobre de 1 dE, l'ull humà podrà percebre diferència entre dues mostres. Desafortunadament – i probablement no ens sorprendrà – no és tan simple. Algunes diferències de colors més grans que la unitat són perfectament imperceptibles. També pot passar que la mateixa diferència de color (dE) entre dos grocs i dos blaus no sembli que hi hagi la mateixa diferència de percepció i que en altres casos pugui ser al revés. Això és degut a les diferents compensacions que tenen els espais de color i la percepció que es té.*

Aquesta diferència de color es pot utilitzar en diverses aplicacions:

- Detecció de derives en el temps. Mesurant el patró de configuració inicial d'una impressora (el primer any de vida) i mesurar al cap d'un temps de vida de la impersora, es podrà calcular els dEs, del patró.
- La desviació entre diferents dispositius/mostres.
- Efectivitat d'una millora.
- Eliminar subjectivitat entre processos, tan com sigui possible.

El dE no es pot aplicar en dues qualsevols mostres Lab. Només es poden calcular els seus dEs, quant s'utilitza el mateix il·luminant, a no ser que l'estudi sigui estudiar una mostra sota diferents il·luminats.

Per entendre les diferències entre els diferents mètodes de càlcul, introduirem una mica d'història i evolució dels diferents mètodes.

L'espai de color CIEL*a*b* (l'anomenem Lab, més curt) fou inventat al 1976 al mateix temps que el delta-E 1976 (dE76[12], popularment es diu dE).

Intenti imaginar una corda estirada en un punt a l'espai Lab, en 3D; el dE76 descriu l'esfera que es forma en moure aquesta corda per totes les direccions possibles en què es pugui direccionar.

[12] Observi l'Annex de càlculs – Càlcul dE76

El problema principal que té el dE76 és que l'espai Lab no és tant perceptualment uniforme com els seus creadors el volien crear. Per un mateix color, si hi ha un dE imperceptible (< 1dE), pot passar que per una altre color, havent-hi el mateix dE, percebem diferència cromàtica. Un altre punt és que la sensibilitat de l'ull és diferent per diferents matisos de colors, per diferents zones cromàtiques i finalment per diferents nivells d'il·luminació. El dE76 no té en compte aquestes diferències.

Si la diferència de color és un número que mostra com de lluny són dues/dos mostres/colors, la tolerància és el significat d'aquest número. Per limitar aquest nivell entre diferència i tolerància definim un límit 3>dE76. S'acceptarà que una mostra és igual versos una altra, si compleix: que l'error produït entre dues mostres es inferior a 3 dE. Es considerarà una mostra és diferent de l'altre si és superior o igual a 3 dE76. Aquest criteri també s'aplicarà a dE94 i dE2k, amb la diferència que ambdós casos el límit estarà a 2 dE94 i 2 dE2k. Val a dir que aquest criteri és només per aquesta aplicació ja que cada mostra pot tenir una variabilitat d'aquest mateixos dEs.

Abans d'explicar els termes dE94 i dE2k cal fer esment d'altres paràmetres que ens ajudaran a determinar aquest últims. Aquests paràmetres prou importants com per explicar-los són: dL, da, db, dc i dh. Que no són més que la diferència entre paràmetres de les dues mostres a comparar.

Els valors dL, da, db, dc i dh són molt importants per determinar el paràmetre que fa empitjorar el dE, si és el dL, da o db (pel cas dE_{Lab}) o si és el dL dc o dh (pel cas de dE_{Lch}). Per un mateix dE, podem tenir valors dL, da i db diferents, aquest ens ajudaran a determinar a on es produeix l'error: si és en el paràmetre L (més clar o més fosc), si és en el paràmetre a (vermells/verds) o si és en el paràmetre b (blaus/grocs).

Si el dE es descriu com una esfera, llavors la diferència entre paràmetres (dL, da i db) descriu un cub en l'espai Lab i la diferència de dL, dc, i dh es descriu com un tros d'anell aplastat o com un tros d'arandella.

A tall d'exemple i per limitar el valor dL, da i db, els utilitzats al projecte per avaluar el model òptim, s'ha fet el següent raonament:

> *Com a límit s'ha agafat el dE76 < 3dE, mirant l'Annex II, el càlcul de dE76 obtenim:*
>
> $$dE76 = \sqrt{dL^2 + da^2 + db^2} \leq 3dE$$
>
> *A on:*
> - *dL = ΔL o la diferència de dues mostres, L^*_1-L^*_2.*
> - *da = Δa o la diferència de dues mostres, a^*_1-a^*_2.*
> - *db = Δb o la diferència de dues mostres, b^*_1-b^*_2.*

llavors:

$$dL^2 + da^2 + db^2 \leq 9dE$$

si escollim com $di^2 = dL^2 = da^2 = db^2$*, i ho substituïm a l'equació anterior obtenim:*

$$di^2 + di^2 + di^2 \leq 9$$

Resolent la inequació, ens dóna:

$$3di^2 \leq 9$$

$$di^2 \leq 9/3$$

$$di \leq \sqrt{3} = 1{,}73$$

Per tant es considerarà una mostra igual quan: dL < 1,73, da < 1,72 i db < 1,73.

Aquest exemple ens ajudarà a determinar si l'error dE produït en dues mostres es produeix a dL, a da o a db.

Pel que fa als valors Lch, per diferents valors de Lch poden referir-se a diferents problemes. Una diferència en L pot provenir d'una diferència del paper, a on es fa la mesura. Una gran diferència en c, pot ser provocada per una diferència en la rugositat del paper i una gran diferència en h, pot ser provocada per la diferència provocada per la tinta.

Com que la sensibilitat de l'ull canvia segons el matís (h), el croma (c) i la lluminositat (L), la tolerància d'una mostra, a on es té com a uns valors acceptables (una mostra és igual a una altre si està dins del rang de tolerància), es descriu com una pilota de rugbi o com una esfera elipsoide. Les fórmules més modernes de diferència de color utilitzen aquesta esfera elipsoide per determinar diferències entre dues mostres i variar uns coeficients, depenent de la indústria a on s'apliquin, per poder comparar mostres segons varis criteris (aquest criteris dependran de la indústria a on s'apliquin).

Al 1984 el CMC, sigles en anglès de "Colour Measurement Committee of the Society of Dyes and Colourists of Great Britain" o el comitè de mesura de color de la societat de tenyidors i coloristes de Gran Bretanya; va desenvolupar i adoptar una equació basada an els valors Lch. La indústria tèxtil va proposar, la diferència de color CMC l:c a on permet ajustar els factors: l de la lluminositat i c de croma. Com que l'ull és més sensible al croma, la proporció per defecte de l:c és 2:1. Hi ha també un factor comercial (cf, sigles en anglès) el qual permet una variació total del tamany de la regió de tolerància segons les diferents exigències d'exactitud. Per cf = 1, significa que un valor més petit que la unitat de dE CMC és acceptable.

El comitè tècnic de CIE (TC 1-29), publica una equació al 1995 anomenada CIE94. L'equació és similar al CMC l:c, però amb funcions de ponderació basada amb experiments de pintures utilitzades en automació i a on la superfície és llisa. També conté factors com el K_L (lluminositat), i k_1 i K_2 (croma) per compensar les diferents sensibilitats que té l'ull humà sobre el croma.

Per últim l'equació dE2000, que sorgeix de la major revisió de l'equació dE94. Si el dE94 corregeix la L* en funció del nivell de lluminositat percebuda; el dE2000 varia els seus factors correctors en funció d'on caiguin els colors de les mostres. El dE2000 està encara en fase de desenvolupament i en diverses aplicacions no se suporta.

Cal esmentar diferents punt que ajudaran a calcular el dE de les mostres correctament:

- Els càlculs de dEs, són basats en colorimetria per tant estan en funció de l'il·luminat.
- Sempre cal especificar com s'ha calculat exactament cada dE.
- Cal escollir les equacions idònies per cada aplicació.
- Per aplicacions generals i per càlculs ràpids es poden utilitzar el dE76.
- Per aplicacions gràfiques es recomana utilitzar el dE94 i potser també el dE-CMC 2:1, i per aplicacions tèxtils el dE-CMC.
- Utilitzar les diferències de color només com a aproximació, sempre verificar tots els càlculs visualment.

En aquest projecte s'han utilitzat tres diferències de color: el dE76, el dE94 i el dE2000. Les diferències de color (en el projecte), no són per comparar visualment si una mostra difereix d'una altre, sinó que serveixen per validar si un algoritme és vàlid; és a dir, els valors trobats a partir del model generat i els valors de l'instrument professional, són dins el marge de toleràncies esmentades abans, o no vàlid. Per tant, caldrà tenir en compte que per colors neutres (és a dir a on a* i b* rondin el zero: colors blancs, grisos i negres) els dE76 i dE94 seran iguals o molt semblants i el dE2000 serà major o menor depenent de les mostres a comparar, per la resta de mostres el dE76 sempre serà superior al dE94 i al dE2000 i que també el dE94 sempre serà superior a dE2000.

Per veure com calcular els diferents dEs que s'utilitzen, observi l'Annex II.

1.4 Objectius

L'objectiu primari del projecte és fer l'algoritme necessari per convertir la senyal que prové d'un densitòmetre de quatre canals, en un colorímetre amb sortida estàndard CIELab. L'algoritme ha de passar de les comptes del fotosensor en valors CIE L*, CIE a* i CIE b*, amb l'il·luminant D50 (2 graus, CIE1964).

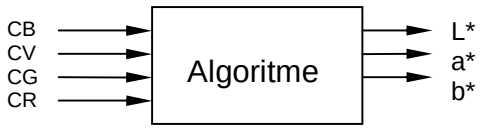


Figura 14 – Objectiu primari

Per tal de desenvolupar l'objectiu primari caldrà assolir varis objectius secundaris que seguidament es descriuen:

- Caldrà buscar una mostra de referència coneguda i estable per fer la calibració del dispositiu.
- Caldrà calibrar l'instrument de mesura proporcionat per dur-l'ho a un estat conegut .
- Escollir el millor mètode d'obtenció de l'algoritme dels tres mètodes que s'utilitzaran en aquest projecte.
- Generar l'algoritme òptim mitjançant la seva validació.

S'ha escollit fer el colorímetre amb els paràmetres L*, a* i b*, perquè utilitza l'il·luminant D50, que és el que s'utilitza en l'empresa a on es dessenvolupa l'instrument.

En una imatge on el canvi de color és progressiu, és difícil detectar si dues fotos són perceptiblement iguals. Pel cas de dE94 i dE2000 els humans podem detectar si un color és diferent d'un altre si la diferència de color (dE94 i dE2000) són superiors a 2 i pel cas de dE76 haurà de ser >3.

El model a dissenyar haurà de complir que la diferència de color dE76<3, dE94<2 i finalment dE2000<2. Aquestes diferències es calcularan amb els valors obtinguts amb l'instrument professinal vs els valors obtinguts amb l'instrument proporcionat juntament amb l'algoritme dissenyat.

2. Estat de l'art

En aquest apartat es veurà una pinzellada de com està en l'actualitat sobre aquests tipus d'instruments.

A l'actualitat es poden veure molt tipus de colorímetres i amb diferents opcions cadascun, de fet cada fabricant intenta introduir una millora respecte els seus competidors fent així que cada fabricant s'especialitzi a un tipus d'aplicacions.

Per generalitzar, els hem classificat per la manera d'adquisició de les dades:

Figura 15 – Diferents dispositius de mesura de color
(font: http://www.xrite.com/product_overview.aspx?ID=812)

- Adquisició mitjançant patrons estàndards pregravats a les impresores, és molt útil per l'anàlisi d'impressions, tot i que és inviable a l'hora de mesurar una superfície rígida i que el seu suport superi el mil·límetre de gruix.
- Adquisició manual: és molt útil per l'adquisició de qualsevol superfície tot i que per grans superfícies és un sistema lent.
- Adquisició amb taula xy: aquest sistema té, a més del dispositiu d'adquisició manual, uns eixos de dos dimensions, que fan moure el dispositiu per tota la superfície a mesurar, és un mixt dels dos anteriors, el qual agafa les parts bones (pot adquirir patrons impresos com també superfícies irregulars). El problema que té aquest dispositiu és que s'ha d'anar amb compte a l'hora de muntar i desmuntar el dispositiu ja que variant l'eix vertical podem influenciar en l'adquisició de les dades i fer mesures errònies. Diguem que és el menys robust dels anteriors esmenats anteriorment.

No tots els dispositius van bé per a tots els tests que es poden realitzar, en cada cas caldrà veure quin instrument li és més adient.

A l'actualitat s'estan utilitzant càmares digitals CCD per la captura de color, seguidament es fa una conversió a paràmetres coneguts. Aquest mètode pot ser útil per a la identificació de persones, per a la indústria farmacèutica, per a la

l'alimentació, pintura i un llarg etc. La qualitat que poden arribar aquests instrument no s'equival als instruments esmentats anteriorment (els dispositius de contacte o de patrons impresos).

Els dispositius anteriorment esmentats utilitzen un il·luminant específic, on cada instrument i fabricant ho detalla a les especifiacions tècniques.

Cada indústria s'ha anat especialitzant segons cada disciplina. En el món industrial d'arts gràfiques sovint s'utilitza els diferents il·luminants D (D50, D55, D60 i D65).

L'instrument proporcionat d'aquest projecte, difereix dels esmentats anteriorment, en que ha estat dissenyat per a ser exclusivament un colorímetre. El disseny físic i els il·luminants (claus en aquests tipus d'instruments) han estat dissenyats per obtimitzar al màxim la seva resposta, és per això que en sorgeix un cost de material molt reduït. Els instruments de mesura professionals, a diferència del dispositiu proporcionat, a més de donar els paràmetres Lab, solen donar més dades, és a dir, els tres estímuls XYZ, l'espectre de la mostra, els valors Lch entre altres; degut a això i a la seva bona qualitat, els preus solen ser de bastants centenars d'euros.

3. Resultats

En aquest apartat es detallen tots els resultats extrets del test i es descriuen vàries observacions i conclusions.

3.1 Pla de treball

El pla de treball sequit ha estat:

Primer de tot i abans de començar s'ha de buscat un material blanc i estable com a referència; la calibració (portar un estat conegut l'instrument) es realitzarà sobre aquest material.

Per assolir l'objectiu del projecte s'ha realitzat el següent test:

- Impressió d'un patró en diferents papers (3 papers en qualitat fotogràfica i 2 papers en qualitat no fotogràfica).
- Mesurar els diferents patrons amb l'instrument professional, seran els valors reals i serviran per fer la conversió de la senyal de l'instrument proporcionat als paràmetres estàndards.
- Calibrar l'instrument proporcionat per cada LED sobre la mostra de referència.
- Mesurar els diferents patrons amb l'instrument proporcionat amb la calibració que cada LED necessiti.
- Buscar un algoritme que trobi, amb els paràmetres de l'instrument proporcionat, els paràmetres de l'instrument professional.
- Per validar l'algoritme trobat, aplicar-lo en un altre patró no utilitzat per la realització del model.

Extracció de resultats i conclusions.

3.2 Calibració

Primer de tot i abans de començar a fer mesures cal calibrar l'instrument per determinar en quin estat es troba.

> *En què consisteix la calibració d'un instrument?*
>
> *Es tracta de conèixer l'estat en que es troba l'instrument, és a dir, fer una mesura sobre la superfície que es vol mesura i dividir aquest valor pel valor que sorgeix de mesurar el blanc de referència. El mínim serà 0 (no retornarà llum) i 1 el mateix blanc de referència, la resta de mostres cauran dins l'intàrval entre 0 i 1 (el blanc de referència té una difusibitat major que qualsevol superfície que s'haurà de mesurar).*

La peça de referència ha de ser, en la mesura del possible, totalment estable, i invariable en el temps i en l'espai. És a dir, tindrà una superfície totalment uniforme i en el rang de temperatura de l'instrument, no s'haurà de percebre cap canvi colorimètric.

Per definir en primer lloc la peça haurà de complir amb següents característiques:

- Color blanc, L* com més gran millor, mínim per sobre de 90.
- Uniformitat espacial < 1 dE76 en una mateix peça.
- Que no es percebi degradació temporal.

Fins fa pocs anys només materials ceràmics complien amb aquestes exigents condicions, en l'actualitat comencen a existir materials no ceràmics que competeixen fins i tot amb millors condicions que els ceràmics.

S'han buscat diversos materials amb les condicions esmentades anteriorment i s'ha fet una comparativa de tots ells.

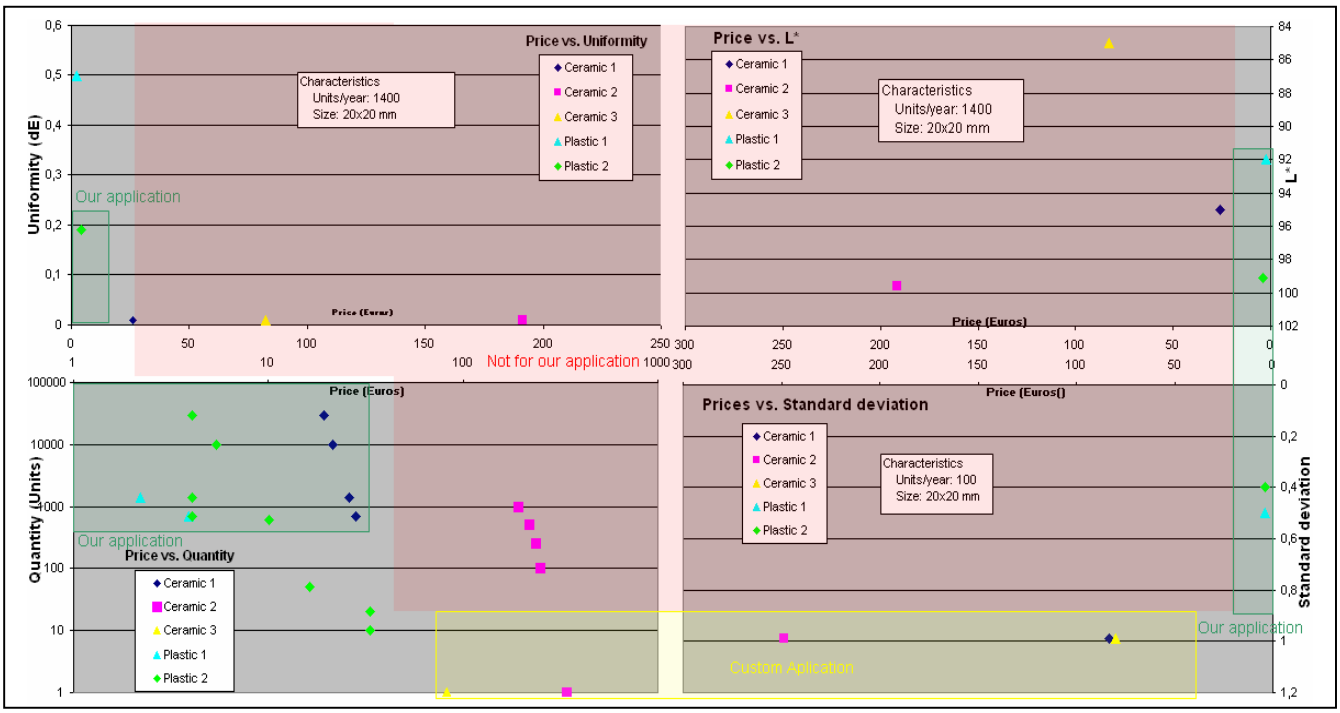


Figura 16 – Comparativa de materials pel blanc de referència

A l'anterior figura es mostra un conjunt de gràfics a on les zones ombrejades de color verd, són les zones d'interès de la nostra aplicació. La zona ombrejada de color groc conté unes condicions molt bones però massa cares com per utilitzar-

les en aquest projecte i la zona ombrejada de color vermell no compleix algunes de les condicions abans esmentades.

Observant les gràfiques de l'anterior figura veiem que hi ha dos materials que poden arribar a competir, els dos són plàstics. Un d'ells (el plàstic 1) al segon quadrant (el gràfic superior de l'esquerra) no compleix el requisit d'uniformitat en la peça. Ens interessa que la mostra sigui la més barata possible (per reduir costos), és per això que posant-nos en contacte amb el fabricant, hem descobert que no ens pot garantir una uniformitat inferior; aquest fabricant no té en compte les propietats colorimètriques de la peça, simplement modifica la forma del plàstic que troba al mercat per generar les peces que se li encarreguen. El material plàstic 1, queda eliminat per la seva baixa qualitat.

El millor preu que s'ha pogut aconseguir de les ceràmiques és d'uns 27 euros aproximadament (també amb un lot de 1000 unitats/any) cosa que aquesta opció es descarta per encarir excessivament el cost final del dispositiu.

S'ha posat en contacte amb el fabricant de plàstic 2, per veure si ens poden oferir aquesta qualitat en totes les peces que se li adquireixin; aquesta vegada, aquest fabricant sí fa controls de qualitat i ens garanteixen que les seves mostres compliran les següents característiques:

Paràmetre	Rang
L*	(98.9,99.1)
a*	(-0.2,0.2)
b*	(-0.2,0.2)
Uniformitat de la peça	< 0.2 dE76
Uniformitat entre peces	< 0.5 dE76
Preu (1000 unitats/any)	5 €/peça

Taula 1 – Característiques de la peça de referència

Amb els resultats de l'anàlisi de materials, la calibració de l'instrument es farà mitjançant el plàstic 2.

Degut a que la quantitat de llum emesa per cada LED varia depenent de la temperatura en que es troba el LED, quan encenem el LED és necessari esperar un temps perquè els LEDs arribin a una temperatura de treball estable i per tan la llum també ho sigui. El procés de calibració és molt senzill, el que s'ha de fer és mantenir el LED durant mig minut encès perquè s'escalfi i arribi a la temperatura de treball, de manera que la llum sigui estable, evitant errors produïts per aquest efecte.

Per realitzar la calibració de l'instrument, doncs, és necessari que l'instrument de mesura proporcionat adquireixi quatre valors del conversor analògic/digital, de la

mostra de referència (el blanc perfecte) aquest valors seran: CB, CV, CG i CR, per conèixer l'estat en que es troba l'instrument. En aquest punt la calibració consisteix en guardar els valors del guany, increment/decrement (offset) que s'està aplicant al circuit condicionador i les comptes del fotosensor del conversor A/D, tota aquesta informació per cada LED. Observi la taula adjunta per veure els seus valors.

Paràmetre	Guany	Offset	Comptes Referència
Blau (B)	2	12	652
Verd (V)	1	15	1015
Groc (G)	2	11	1020
Vermell (R)	2	10	848

Taula 2 – Dades de calibració

Per fer una mesura caldrà aplicar aquests mateixos guanys i offsets per cada LED.

3.3 Mesura

Una vegada l'instrument està calibrat, el procés de mesura consistirà en utilitzar l'estat conegut, per cada LED. Per fer això caldrà aplicar els guanys i offsets guardats per cada LED i adquirir la resposta del conversor A/D de la superfície que es vol mesurar mentre s'està il·luminant amb un LED, d'aquí sobtindran els quatre valors per superfície a mesurar.

Per donar el significat adequat a les mesures, s'ha optat per fer una mesura relativa, és a dir, mesurar primer el punt de referència (la mostra de plàstic 2) amb un LED i després mesurar el punt a adquirir amb el mateix LED (s'ha de fer aquest procés amb els quatre LEDs, per separat, canviant el guany i offset per cada LED). Una vegada adquirida la informació, s'ha dividit la mesura de la mostra amb els valors adquirits de la peça de referència. El valor trobat, serà un valor entre 0 i 1; a on 0 significa que rebota molt poca llum de la superfície a mesurar, per tant la mostra tendeix a ser més fosca com més s'acosta a 0 i pel contrari, com més s'acosti a 1, la mostra més clara serà.

Per simplificar, cada mesura contindrà la informació dels quatre LEDs:

$$B = \frac{CBm}{CBb} \qquad \textbf{\textit{Equació 1}}$$

$$V = \frac{CVm}{CVb} \qquad \textbf{\textit{Equació 2}}$$

$$G = \frac{CGm}{CGb} \qquad \textbf{\textit{Equació 3}}$$

$$R = \frac{CRm}{CRb} \qquad \textbf{\textit{Equació 4}}$$

A on:

- *B és la mesura relativa del LED blau. CBm són les comptes del convertidor A/D de la superfície a mesurar i CBb són les comptes del conversor A/D de la mostra blanca, la de referència, ambdós casos il·luminant amb el LED blau.*
- *V és la mesura relativa del LED verd. CVm són les comptes del convertidor A/D de la superfície a mesurar i CVb són les comptes del conversor A/D de la mostra blanca, la de referència, ambdós casos il·luminant amb el LED verd.*
- *G és la mesura relativa del LED groc. CGm són les comptes del convertidor A/D de la superfície a mesurar i CGb són les comptes del conversor A/D de la mostra blanca, la de referència, ambdós casos il·luminant amb el LED groc.*
- *R és la mesura relativa del LED vermell. CRm són les comptes del convertidor A/D de la superfície a mesurar i CGb són les comptes del conversor A/D de la mostra blanca, la de referència, ambdós casos il·luminant amb el LED vermell.*

3.4 Entrenador

L'entrenador consisteix en un conjunt de línies de codi generat amb Matlab, per tal de trobar els valors Lab mitjançant la informació que se'n pot extreure de la superfície a mesurar (els valors relatius BVGR).

S'ha implementat aquest diagrama de blocs per buscar una funció per cada paràmetre. Una funció pel valor L* (L* $_{BVGR}$), una funció pel valor a* (a* $_{BVGR}$) i una altre funció pel valor b* (b*$_{BVGR}$).

Les entrades de l'entrenador són les dades que provenen de l'instrument proporcionat (dades BVGR), i les sortides hauran de ser les dades adquirides per l'instrument professional (dades CIELab anomenades Lab_{REAL}).

L'entrenador ha de trobar els coeficients de la funció L. Aquests coeficients seran els que provoquin l'error dL més petit de tots (error promig de totes les motres). Aquest dL es calcularà amb la L provinent de la funció com a variables d'entrada (BVGR) i la L provinent de l'instrument professional. L'entrenador farà el mateix pels valors a i b (amb diferents coeficients), d'aquesta manera s'obtindran els coeficients de conversió de BVGR a Lab.

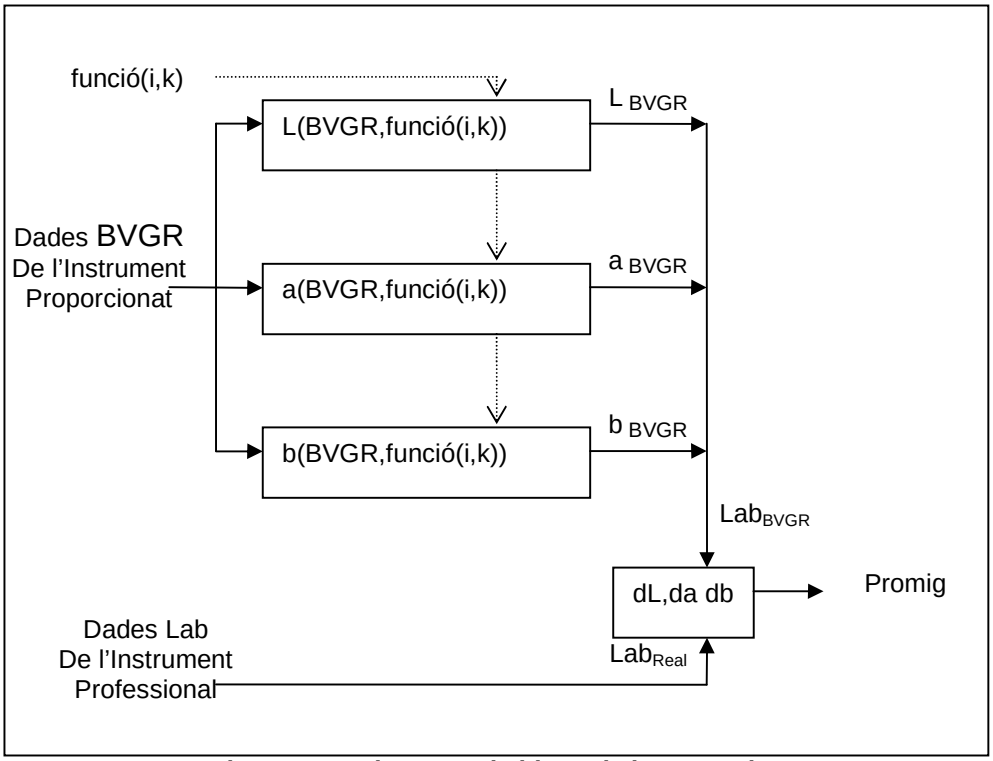


Figura 17 – Diagrama de blocs de l'entrenador

L'entrenador busca els coeficients k de la funció(i) aleatòriament quan la mitjana de l'error comès no és per sota de 15 d (a on d pot ser dL, da o db depenent de la variable a trobar). Quan es dóna el cas que la mitjana és inferior a 15 d, llavors passa a incrementar/decrementar els coeficients un a un segons la mitjana vagi millorant.

Si la mitjana que surgeix de l'entrenador és inferior a 1,73 d, es dóna com a vàlida la funció utilitzada i mostra per pantalla (Matlab) els coeficients, el valor d promig (dL, da o db) de totes les mostres i el màxim.

Aquest entrenador s'ha utilitzat amb els mètodes de càlcul matemàtic: aproximació per polinomis i per la matriu pseudoinversa de Moore-Penrose; els quals s'expliquen seguidament.

3.5 Conversor analògic digital

Per no sobredimensionar/sotadimensionar el sistema electrònic d'adquisició s'ha realitzat un estudi, apart, que ens mostra la variabilitat produïda per l'adquisició del convertidor analògic/digital. Aquest estudi consisteix en variar el nombre de bits del convertidor analògic digital mitjançant les mateixes mostres obtingudes amb un conversor de 16 bits (que l'hem considerat ideal).

En comptes d'adquirir les mostres una vegada darrera l'altre canviant l'electrònica (modificant el conversor A/D per cada nova adquisició) i per tant encarint el procés de desenvolupament i augmentant la incertesa en la mesura, s'ha programat mitjançant un sistema parametritzat amb Matlab, de manera que es veu la variabilitat només produïda per l'adquisició del convertidor analògic digital, tenint en compte com a valor real, les dades adquirides amb el conversor analògic digital de 16 bits.

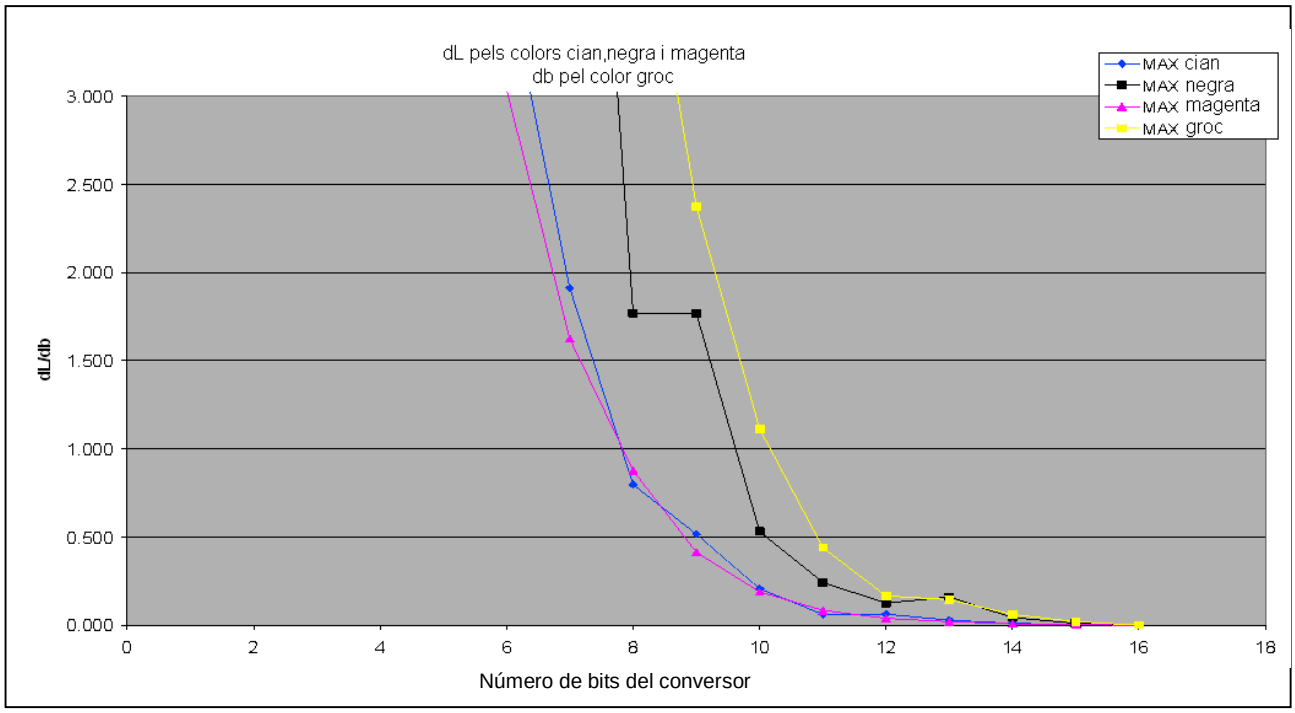


Figura 18 – Número de bits del conversor

A l'anterior gràfica s'observa que per aquesta aplicació és important que el conversor A/D sigui de com a mínim 10 bits (per dispositius de qualitat mitjana) i per aplicacions on es vulgui un efecte nul degut al conversor A/D cal que sigui un conversor de 11 o 12 bits; augmentar el conversor en més de 12 bits no seria adient, donat que la pròpia incertesa de l'instrument professional és de 0,5 dE i per tant estaríem adquirint incertesa inecessàriament.

3.6 Mètodes matemàtics

En aquest apartat es mostren els mètodes matemàtics utilitzats per a la generació del model.

Hi han molts mètodes per l'obtenció del model òptim, en aquest projecte es veuran tres mètodes diferents i en cadascun d'ells es veuran diferents resultats que ens ajudarà a desastimar o acceptar el model.

En primer lloc s'obtindrà el model per aproximació per polinomis arbitraris, consisteix en trobar els coeficients d'un polinomi (de primer i segon ordre) per tal que amb els valors de l'instrument proporcionat, donin els valors de l'instrument professional. Seguidament hi ha el mètode gràfic, es tracte de visualitzar les dades de manera que es van tractant les dades BVGR perquè es s'equiparin a les sortides desitjades. I per últim, el mètode matricial, amb l'obtenció dels coeficients matricials amb el mètode Moore-Penrose.

3.6.1 Aproximació per polinomis arbitraris

Aquest mètode consisteix en aplicar varis polinomis mitjançant l'entrenador descrit anteriorment. Primer es buscaran polinomis senzills i amb pocs coeficients, com més senzill sigui menys costós serà implementar-lo (com més gran sigui la funció i major nombre d'operacions, major serà el dimensionament per fer tots aquest càlculs, fent més costós l'instrument). Segons això, s'han provat amb vàries funcions de primer ordre detallades a la següent taula, per veure si assolien els objectius proposats, recordem que l'objecitiu és que totes les diferències d'error (dL, da i db) estiguin igual o per sota de 1,73; a la part esquerra de la taula veiem l'error comés per cada funció utilitzada.

Sistema d'equacions utilitzat		**Resultats obtinguts**	
		Diferència de Color Promig	Diferència de Color Màxim
Sistema 1er ordre, 1	*L* = 16,01(B + V + G + R) + 34,33*	5,66	31,77
	a = -0,23(B + V + G + R) + 0,48*	13,35	82,36
	b = 0,46(B + V + G + R) - 2,46*	16,24	101,06
Sistema 1er ordre, 2	*L* = 14,22B+30,99V + 11,27G + 14,15R + 29,51*	4,96	27,16
	a = -1,36B-1,53V + 0,89G + 1,68R + 0,21*	13,03	80,68
	b = -4,13B+3,05V + 2,63G + 2,13R - 2,79*	15,50	96,83
Sistema 1er ordre, 3 *s= B+V+G+R*	*L* = 24,78B/s + 54,22V/s + 59,22R/s-19,78R/s + s*	5,30	27,38
	a = -60,29B/s – 38,29V/s + 65,71G/s+ 79,71R/s + s*	10,13	38,39
	b =-110,12B/s + 33,88V/s + 49,28G/s+ 24,48R/s + s*	10,68	64,26

Taula 3 – Sistemes de primer ordre i resultats

Les dades de la taula anterior s'obtenen de l'entrenador descrit anteriorment.

Observat les diferències de color promig, veiem que amb aquest resultats no és possible implementar un bon algoritme. Ara passarem a buscar funcions de segon ordre, mitjançant el mateix mètode, buscant polinomis per tal de que l'error comés promig sigui inferiror a 1,73.

Sistema d'equacions utilitzat		**Resultats obtinguts**	
		Diferència de Color Promig	Diferència de Color Màxim
Sistema 2er ordre, 1	*L*= 139,4B + 128,1V + 249,3G -162,5R - 182,3*B^2 + 5,29*V^2 + 357,3*G^2 - 82,18*R^2*	10,29	93,39
	a= 49,41B – 175,6V + 30,11G + 71,49R - 10,99*B^2 – 145,61*V^2 + 87,49*G^2 + 74,5*R^2*	2,91	13,14
	b= -211,7B + 84,83V + 137,7G + 47,43R + 92,76*B^2 + 145,1*V^2 – 69,91*G^2 - 199,3*R^2*	6,82	54,07
Sistema 2er ordre, 2	*L* = -56,9B/s + 70,13V/s - 69,87G/s + 82,13R /s +91,87(B/s)^2 -75,87(V/sa)^2 + 44,13(G/s)^2 - 35,87 (R/s)^2 + 37,12s – 3,98s^2*	4,17	17,77
	a = -7,44B /s + 3,56V /s -70,44G/s + 99,56R /s - 66,44(B/s)^2 - 48,44(V/sa)^2 + 28,76(G/s)^2 + 17,76(R/s)^2 - 2,14s + 0,33s^2*	10,11	56,31
A On: *s = B + V + G + R*	*b* = -86,36B/s + 41,64V/s + 13,64G/s + 9,64R/s - 67,36(B/s)^2 + 14,64(V/sa)^2 + 62,64(G/s)^2 - 38,36(R/s)^2 + 6,04s – 0,53 s^2*	11,60	71,09

Taula 4 – Sistemes de segon ordre i resultats

S'observa que amb aquests polinomis no s'arriben als objectius proposats.

Per visualitzar els resultats d'una manera clara i entenedora hem realitzat el promig dels diferents valors dL (pels sistemes de primer ordre) i n'hem obtingut un dL_{1er} = 5,31; fent això amb els altres valors da_{1er}=12,17 i db_{1er}=14,14 s'ha calculat el dE76 = 19,40. Fent el mateix pel sistema de segon ordre s'ha trobat: dL_{2on}=7,23, da_{2on}=6,51 i db_{2on}=9,21 i calculat l'error comés dE76=13,40. Amb aquest resultats podem observar que com més informació posem al polinomi més disminuim l'error comès (tret del paràmetre dL, que pel sistema de primer orde sorgeix més petit que en el segon), això ens ho hem d'agafar com a anècdota ja que pot ser que els coeficients del polinomi per trobar L* siguin més òptims en el sistema de primer order que en el sistema de segon ordre.

El següent gràfic podem veure la tendència decreixent de dE76 produit pel canvi d'ordre dels polinomis utilitzats per trobar els paràmetres reals.

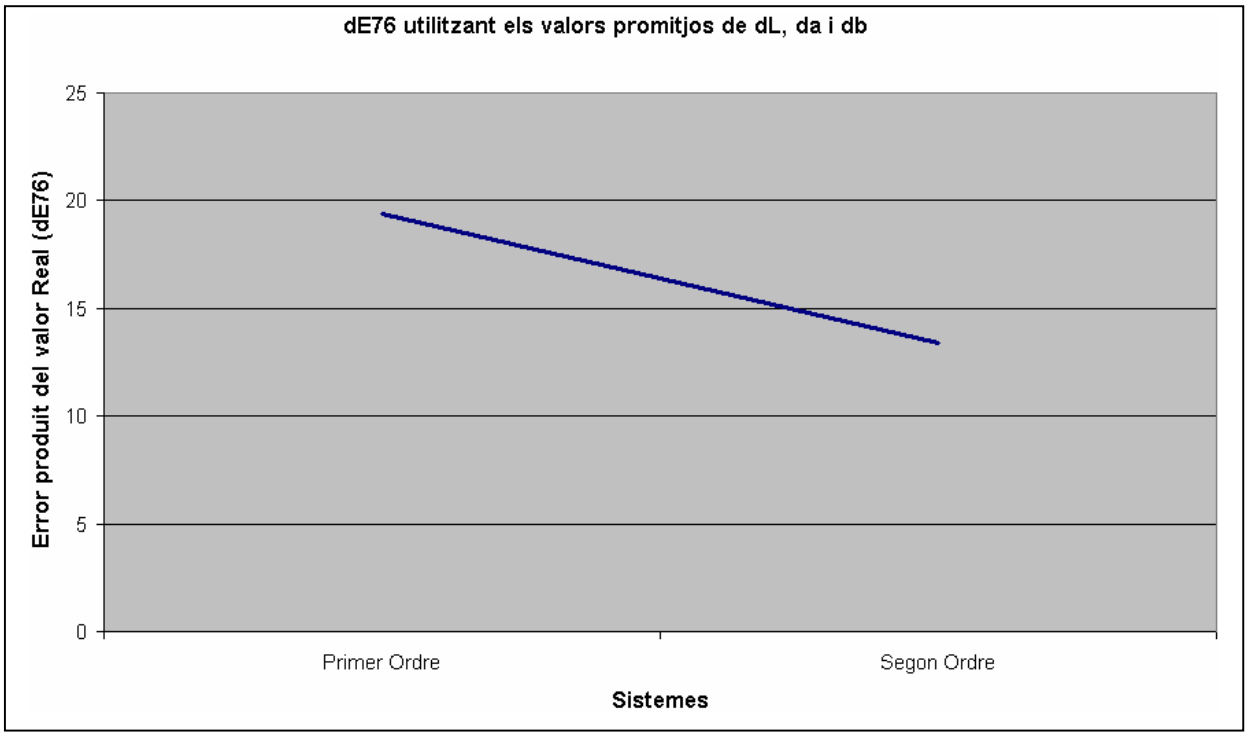


Figura 19 – dE76 dels sistemes de 1er i 2on ordre utilitzats

Extrapolant la gràfica podríem millorar l'error comès fins a un cert punt, posant més ordres de magnitud als polinomis. Però es considera no avnaçar per aquest camí (polinomis grans significar engrandir l'ASIC, major nombre d'operacions i per tant augmentar el cost final del producte).

3.6.2 Aproximació per extrapolació de gràfics

En aquest segon mètode d'obtenció del model, el primer que farem serà fer vàries gràfiques (de les dades obtingudes dels tests) per veure si les dades es correlen (i tendeixen a una recta, per simplificar) i seguidament extrapolarem les dades a partir de les gràfiques obtingudes.

Per a veure les dades a mode gràfic, utilitzarem una funció lineal per a cada LED, és a dir L*(B), L*(V), L*(G) y L*(R). A on L* són els paràmetres de l'instrument professional i BVGR la resposta de la mateixa mesura però amb l'instrument proporcionat, de manera que en l'eix de coordenada x hi ha la resposta del LED (la resposta B, la V, la G o la resposta R) i a l'eix de coordenades y, hi ha el parámetre L*, observi la següent gràfica per veure la relació: resposta de l'instrument professional en funció de l'instrument proporcionat.

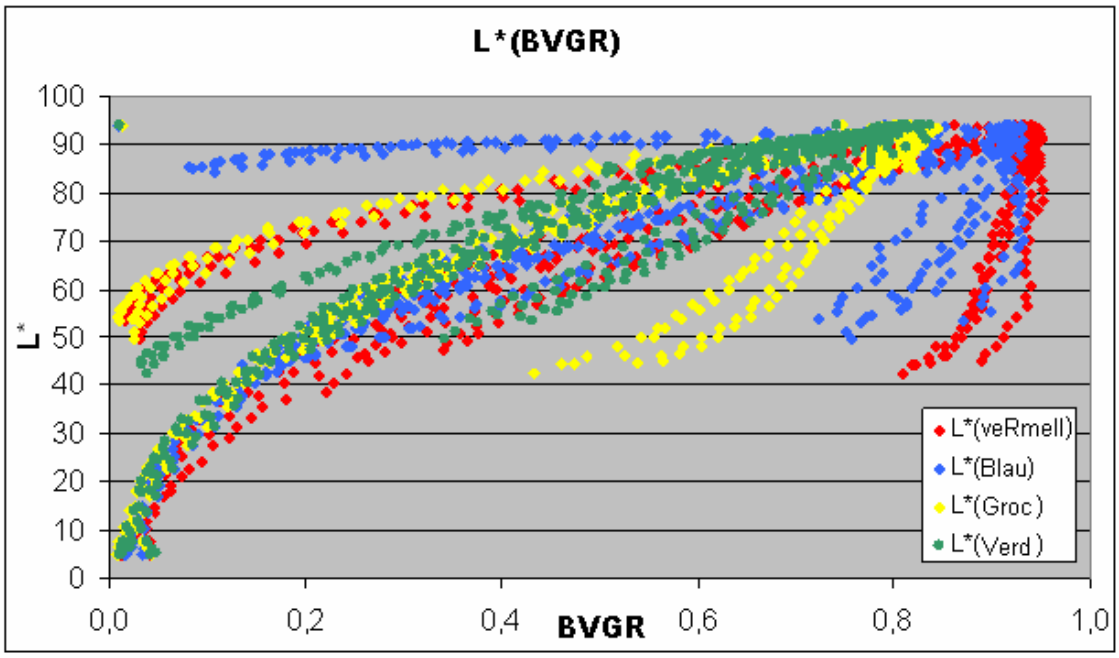


Figura 20 – L*(B), L*(V), L*(G) i L*(R)

El patró són rampes esglaonades de diferents colors (on es modifica la lluminositat per cada grao), cada rampa d'un color va del 0% (blanc del paper) al 100% (màxima coloració possible d'aquell color). Podem veure que cap de les funcions es correlacionen a una recta, llavors provarem de fer alguna operació entre elles, perquè la correlació s'acosti a 1. Per fer això seguirem varis passos per entendre el que s'està fent:

Pas 1:

Generar un polinomi de primer grau, que contigui totes les variables de l'instrument proporcionat, per aconseguim linealitzar la resposta a totes les mostres. Per fer això s'han buscat varis polinomis i el millor trobat ha estat:

$$FL = 10 * \sqrt{-0{,}5B + 5V + 1{,}5G + 0{,}5R} \qquad \textit{Equació 5}$$

$$L^* = -0{,}0537 * FL^2 + 5{,}5346 * FL - 9{,}1298 \qquad \textit{Equació 6}$$

Observi la gràfica següent per veure la funció FL, veiem que millorem la resposta i es linealitza bastant bé; posant a l'eix de coordenades el valor B+V+G+R i l'eix d'abscisses el valor FL, de la fòrmula.

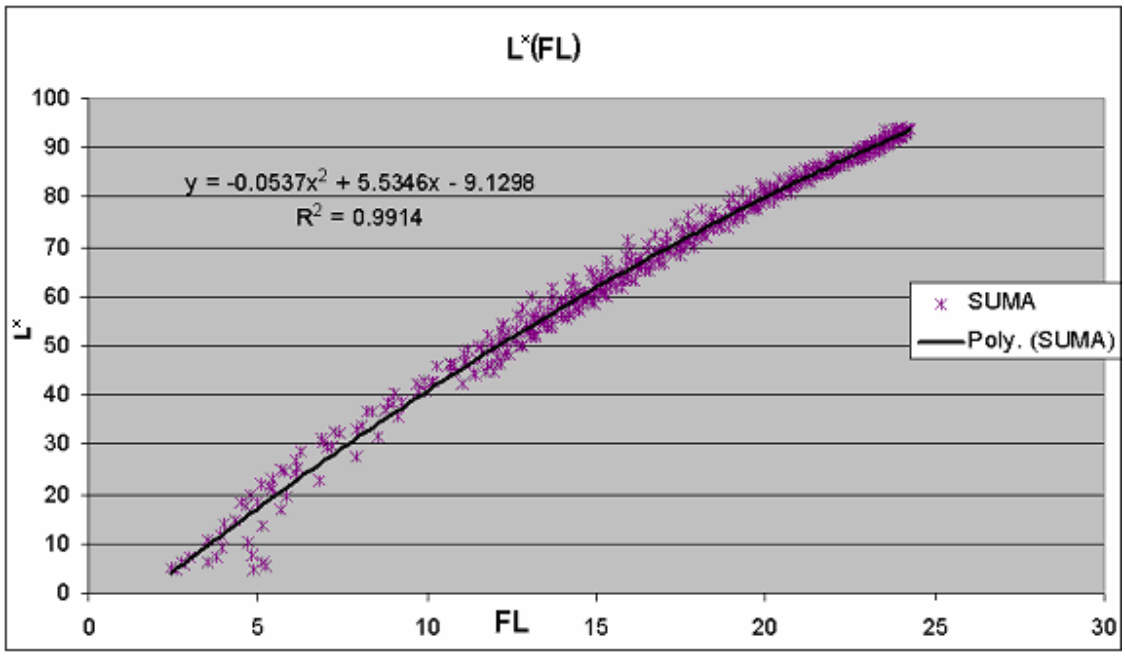


Figura 21 – L*(FL)

Pas 2:

Per a trobar L* hem de buscar una aproximació de la funció FL, l'aproximació es farà mitjançant els mínims quadrats de FL. Observi, en el gràfic anterior, la línia negra, juntament amb la fórmula que la descriu com també la correlació que és 0,9914.

Pas 3:

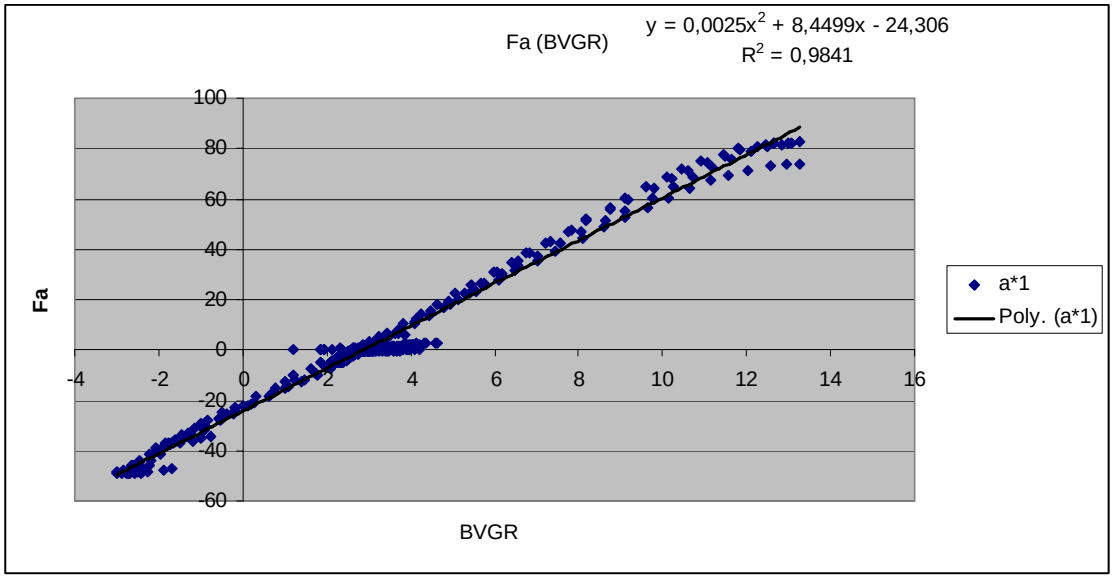
Per fer la comprovació de la fórmula (trobar la diferència entre el valor calculat i el real) mitjançant els quatre valors per cada mostra del test realitzat (valors BVGR) es calcula la funció FL i seguidament amb la funció L*(FL) es

calcula la L* de totes les mostres realitzades; aquest valor L* serà el resultat provinent de l'instrument proporcionat.

Pas 4:

Cada valor L* de l'instrument proporcionat es resta al valor de la L* de l'instrument professional, per tal de trobar la diferència de cada mostra. Es promitgen totes les diferències i es troba que el promig és de dL = 1,34. Un resultat prou bo, ja que el valor és inferior als 1,73 màxim que pot donar.

Pel cas de a* s'intenta realitzar de la mateixa manera, però utilitzant un polinomi diferent. Pel cas de a* obtenim Fa, qué és la que més es correla de les diferents funcions provades, observi la gràfica obtinguda:



$$a^*=Y_{a\ la\ gràfica}= 0{,}0025Fa^2+8{,}4499Fa-24{,}306 \qquad \textbf{Equació 7}$$

Mitjançant aquestes funcions s'ha obtingut un promig de da = 2,31. Resultats no acceptables com a vàlids, siguent el màxim a 1,73 da. Per aquest mètode no serveix per calcular el valor a* de l'instrument proporcionat.

Per calcular b* s'ha seguit el mateix procediment, observi la pàgina següent els resultats obtinguts.

Figura 22 – Funció Fa

Podem veure que aquesta vegada les dades també es poden extrapolar a un polinomi, però clarament hi haurà un major error perquè en Fa=3, hi ha una major disperció de valors, això també passa a partir de Fa > 8.

A on:

$$Fa = 11sin(B)-30sin(V) + 6sin(G)+20sin(R)+1 \qquad \textbf{Equació 8}$$

I extrapolant de la gràfica mitjançant els mínims quadrats obtenim:

Calculant, amb el mateix mètode, la funció Fb pel càlcul de b*, obtenim:

$$Fb = -2sin(B)+1,5sin(V) – 0,5sin(G)+sin(R) \qquad \textbf{Equació 9}$$

Aplicant la funció Fb per després extrapolar la funció b*, s'obté la gràfica següent:

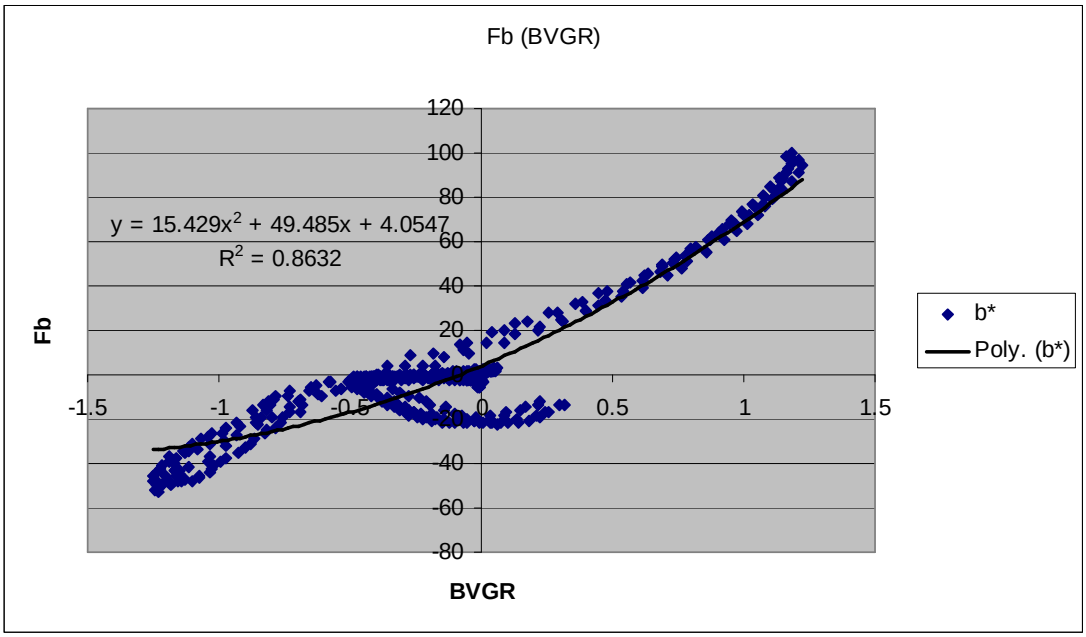


Figura 23 – Funció Fb

Amb aquest procés, la funció Fb que es mostra és la més bona d'entre vàries testades, amb això i aplicant l'extrapolació de la gràfica s'obté un db promig de 20,31, aquest mètode és inviable pels seus pèssim resultats.

Podem dir que amb aquest mètode només podríem aprofitar el càlcul de la L*. Per assolir els objectius proposats, en el següent apartat es mostra un altre mètode d'obtenció dels valors L* (per millorar-lo), a* i b* per disposar, com a mínim, de bons aproximadors.

3.6.3 Mètode Moore Penrose (Matriu pseudoinversa)

El mètode Moor-Penrose, és un mètode d'obtenció de la millor matriu solució (pel mètode mínims quadrats) d'un sistema d'equacions lineals. Les equacions estan definides una a cada fila; cada columna és un coeficient diferent, com més columnes tingui més termes tindran les diferents equacions.

Per trobar els valors de la matriu pseudoinversa no lineal hem de seguir els passos que aquí s'enumeren:

Pas 1: posar les dades adquirides per l'instrument proporcionat a la matriu BVGR, a on cada columna conté la informació del mateix LED i cada fila l'informació d'una superfície a mesurar diferent. Hem de posar a la matriu LAB les dades Lab adquirides amb l'instrument professional, de manera que a la primera columna sigui L*, la segona a* i la tercera la b* i amb el mateix cas que l'anterior, cada fila contindrà la informació de la superfície que es correspongui amb les dades extretes de l'instrument proporcionat. Provem amb la següent funció matricial:

*LAB = BVGR * M_MOORE* ***Equació 10***

O que és el mateix que:

$$\begin{bmatrix} L_1^* & a_1^* & b_1^* \\ L_2^* & a_2^* & b_2^* \\ ... & & \\ L_n^* & a_n^* & b_n^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 & V_1 & G_1 & R_1 \\ B_2 & V_2 & G_2 & R_2 \\ .... & & & \\ B_n & V_n & G_n & R_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \mathrm{c}11 & \mathrm{c}12 & c13 \\ c21 & c22 & c23 \\ c31 & c32 & c33 \\ c41 & c42 & c43 \end{bmatrix}$$

A on:

- *LAB* = $\begin{bmatrix} L_1^* & a_1^* & b_1^* \\ L_2^* & a_2^* & b_2^* \\ ... & ... & ... \\ L_n^* & a_n^* & b_n^* \end{bmatrix}$
- *BVGR*= $\begin{bmatrix} B_1 & V_1 & G_1 & R_1 \\ B_2 & V_2 & G_2 & R_2 \\ .... & & & \\ B_n & V_n & G_n & R_n \end{bmatrix}$
- *La matriu LAB, són els valors de les diferents mostres de l'instrument professional.*
- *La matriu BVGR, són les dades adquirides amb l'instrument disseny de manera que a cada fila es correspon a la mesura Lab de la mateixa superfície.*
- *Els valors de la matriu M_MOORE $C_{1\div4,1\div3}$ seran els coeficients calculats pel mètode Moore-Penrose.*

Per relacionar les dades de l'instrument professional amb les dades de l'instrument proporcionat, necessitem una matriu de conversió (a l'equació anterior anomenada M_MOORE).

Pas 2: per trobar la matriu pseudoinversa, hem d'insertar les dades a Matlab. Utilitzar la funció pinv, amb les dades de la matriu BVGR: pinv(BVGR); que ens donarà la matriu $BVGR_{INV}$. És a dir:

```
BVGRINV = pinv(BVGR);
```

Pas 3: trobar la matriu de conversió d'espai BVGR a Lab.

Aïllant l'Equació 10, per obtenir la matriu M_MOORE:

$BVGR_{INV}$ * LAB = $BVGR_{INV}$ * BVGR * M_MOORE

$BVGR_{INV}$ * LAB = I * M_MOORE

Obtenim:

$M_MOORE = BVGR_{INV} * LAB$ ***Equació 11***

A on:

- *I, matriu unitària.*
- *BVGR, dades adquirides per l'instrument porporcionat.*
- *LAB, dades adquirides per l'instrument professional.*
- *$BVGR_{INV}$, matriu pseudoinversa no lineal (Mètode Moore Penrose) de la matriu BVGR; calculada en Matlab amb pinv(BVGR).*
- *M_MOORE, matriu de conversió de BVGR Lab.*

Per tant, de l'Equació 10 (LAB_m = $BVGR_m$* M_MOORE), substituïm els valors a les matrius i obtenim:

$$\begin{bmatrix} L^* & a^* & b^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & V & G & R \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -1{,}58 & 23{,}41 & -108{,}01 \\ 100{,}77 & -121{,}18 & 117{,}90 \\ -186{,}72 & 3{,}75 & 52{,}13 \\ 182{,}59 & 77{,}35 & -27{,}99 \end{bmatrix}$$

Amb la matriu calculada amb el mètode Moore-Penrose s'obté la següent taula:

	dL	da	db
Promig	8,52	3,65	3,53
Màxim	29,69	19,93	25,63

Taula 1 – Diferències de color trobats mitjançant el mètode Moore-Penrose (primer ordre)

Les diferències de colors són massa alts com per poder realitzar un bon colorímetre amb aquesta configuració, per a millorar els resultats introduirem a la matriu BVGR els quadrats de cada mesura així com el producte dels dos LEDs més pròxims entre ells, d'aquesta manera es pretendrà fer una matriu pseudoinversa de segon ordre.

Per tan ara tindrem a la matriu $BVGR_2$:

$$BVGR_2 = \begin{bmatrix} B_1 & V_1 & G_1 & R_1 & B^2{}_1 & V^2{}_1 & G^2{}_1 & R^2{}_1 & BV_1 & VG_1 & GR_1 \\ B_2 & V_2 & G_2 & R_2 & B^2{}_2 & V^2{}_2 & G^2{}_2 & R^2{}_2 & BV_2 & VG_2 & GR_2 \\ ..... & & & & & & & & & & \\ B_n & V_n & G_n & R_n & B^2{}_n & V^2{}_n & G^2{}_n & R^2{}_n & BV_n & VG_n & GR_n \end{bmatrix}$$

Utilizant $BVGR_2$ i l'Equació 11 ($M_MOORE = BVGR_{2INV} * LAB$), s'obté la matriu M_MOORE_2:

$$M_MOORE_2 = \begin{bmatrix} 30{,}07 & 6{,}25 & -173{,}42 \\ 94{,}49 & -159{,}61 & 164{,}33 \\ -96{,}63 & 138{,}01 & 19{,}82 \\ 170.32 & 15.46 & 24{,}90 \\ -5{,}73 & -11{,}91 & 79{,}85 \\ -16{,}68 & 61{,}75 & -40{,}44 \\ 432{,}16 & 182{,}32 & -155{,}48 \\ 35{,}89 & 163{,}10 & -142{,}51 \\ -27{,}85 & 41{,}34 & -55{,}19 \\ -48{,}23 & -60{,}90 & 15{,}84 \\ -455{,}60 & -379{,}09 & 277{,}25 \end{bmatrix}$$

Llavors per trobar les dades Lab mitjançant les dades de l'instrument proporcionat és necessari fer el càlcul de les mesures amb:

$$\begin{bmatrix} L^* \\ a^* \\ b^* \end{bmatrix}^t = \begin{bmatrix} B & V & G & R & B^2 & V^2 & G^2 & R^2 & BV & VG & GR \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 30{,}07 & 6{,}25 & -173{,}42 \\ 94{,}49 & -159{,}61 & 164{,}33 \\ -96{,}63 & 138{,}01 & 19{,}82 \\ 170.32 & 15.46 & 24{,}90 \\ -5{,}73 & -11{,}91 & 79{,}85 \\ -16{,}68 & 61{,}75 & -40{,}44 \\ 432{,}16 & 182{,}32 & -155{,}48 \\ 35{,}89 & 163{,}10 & -142{,}51 \\ -27{,}85 & 41{,}34 & -55{,}19 \\ -48{,}23 & -60{,}90 & 15{,}84 \\ -455{,}60 & -379{,}09 & 277{,}25 \end{bmatrix}$$

Equació 12

Amb aquesta nova matriu M_MOORE$_2$ s'obtenen els resultats de la taula següent:

	Diferències de color		
	dL	da	db
Promig	2,95	1,04	1,25
Màxim	15,29	5,11	6,22

Taula 2 – Diferències de color trobats (matriu M_MOORE$_2$)

Veiem que amb da i db és un molt bon resultat, i pel cas de dL no és acceptable, de moment, ens quedem amb aquest mètode pels pròxims apartats, veurem si és un mètode adient (donat que els resultats obtinguts sempre s'han fet servir els valors dels quals s'han fet l'algoritme, no s'han validat, és a dir no s'ha comprovat si l'algoritme és correcte en tots els casos).

3.7 Colorímetres amb diferent número d'il·luminats

Per veure la variació produïda pel nombre de LEDs utilitzats en la implementació del model i per poder estimar el nombre màxim de LEDs que s'haurien d'utilitzar si el model trobat no complís amb les condicions inicials, s'ha realitzat el següent estudi: es dissenya un colorímetre amb un LED, un altre colorímetre amb dos LEDs, un altre colorímetre amb tres LEDs i finalment es dissenya un colorímetre amb quatre LEDs. Tots els dissenys s'han elaborat amb el mètode Moore-Penrose.

3.7.1 Colorímetre amb un il·luminant

Per començar el disseny amb només un il·luminant, s'ha escollit el LED verd (V) per tenir un major rang dinàmic en la resposta de l'instrument disseny i també perquè és el que dóna més informació en tot l'espectre visible (és el LED que està més centrat de l'espectre visible). El problema que presenta és que tota la senyal que està per sota de 450nm i més gran de 600 nm es perd, això ens pot fer intuir que no obtindrem un colorímetre molt precís.

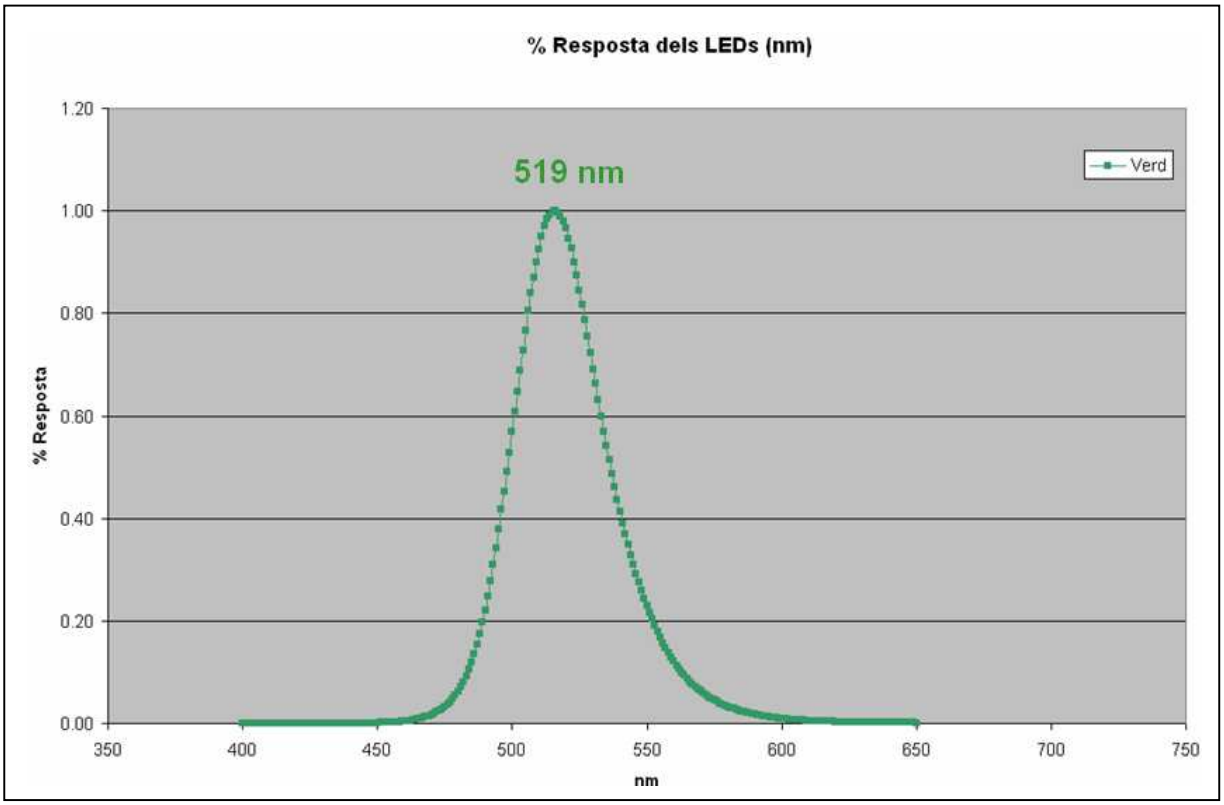


Figura 24 – Espectre de l'il·luminant

Aplicant el model trobat a l'apartat anterior i utilitzant només un il·luminant obtenim:

$$\begin{bmatrix} L_i^* & a_i^* & b_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i & V_i^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 229{,}63 & 24{,}78 & -31{,}85 \\ -149{,}91 & -41{,}28 & 53{,}75 \end{bmatrix}$$

A on:

- *L^*_i, a^*_i y b^*_i, són les dades adquirides de l'instrument professional.*
- *V, és resposta relativa al blanc de referència del dispositiu, il·luminant la mostra a mesurar, amb el LED verd (CVm/CVb).*
- *CVm són les comptes del conversor A/D de la mostra a mesurar quan és il·luminada amb el LED verd.*
- *CVb són les comptes del conversor A/D del blanc de referència quan és il·luminada amb el LED verd.*
- *i, representa l'índex de totes les dades utilitzades per a la realització del model (575 mostres).*

	Diferència de color Promig	Diferència de color Màxim
dL	7,67	37,11
da	14,32	81,63
db	17,94	100,66

Taula 3 – Resultats (un il·luminant)

3.7.2 Colorímetre amb dos il·luminats

Per a la generació d'aquest colorímetre s'ha escollit, a més del LED verd, el LED vermell, perquè l'espectre del LED vermell, és el més allunyat del verd i així augmentar la resolució en la zona de vermells. Mitjançant la gràfica següent veiem que podem ampliar la captura d'informació de l'espectre de la mostra. El problema és que també perdem la informació fins al 450 nm, però podem adquirir informació de la mostra de 450nm a 700nm; val a dir que als voltants dels 590 nm hi haurà una degradació de la precisió, degut a que amb la superposició dels espectres dels dos LEDs, hi ha una senyal mínima entre els dos il·luminants.

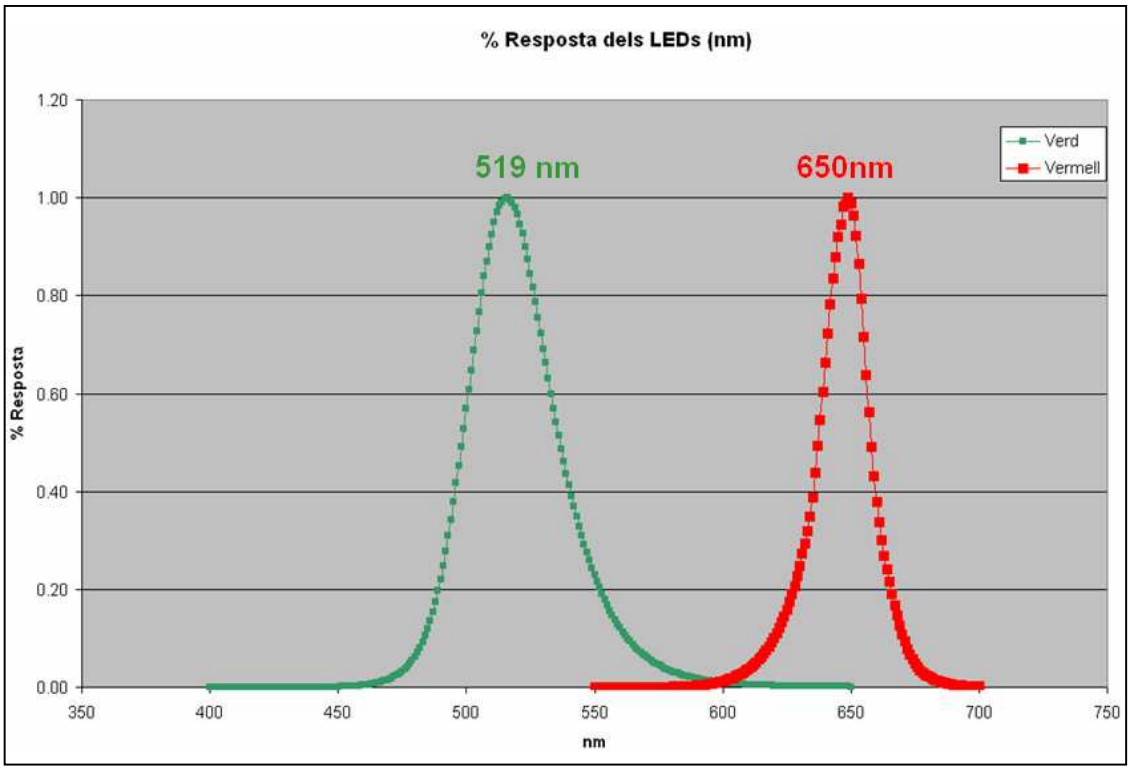


Figura 25 – Espectra dels dos il·luminants

Aplicant el mètode trobat amb els dos il·luminants esmentats obtenim:

$$\begin{bmatrix} L_i^* & a_i^* & b_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i & R_i & V_i^2 & R_i^2 & V_i R_i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 142.40 & -155.35 & 14.34 \\ 73.73 & 131.62 & -35.60 \\ -74.10 & 112.38 & -168.53 \\ -33.85 & -29.31 & -12.34 \\ -21.84 & -61.86 & 214.04 \end{bmatrix}$$

A on:

- *L^*_i, a^*_i y b^*_i, són les dades adquirides de l'instrument professional.*
- *V, és resposta relativa al blanc de referència del dispositiu, il·luminant la mostra a mesurar, amb el LED verd (CVm/CVb).*
- *R, és resposta relativa al blanc de referència del dispositiu, il·luminant la mostra a mesurar, amb el LED vermell (CRm/CRb)*
- *CRm són les comptes del conversor A/D de la mostra a mesurar quan és il·luminada amb el LED vermell.*
- *CRb són les comptes del conversor A/D del blanc de referència quan és il·luminada amb el LED vermell.*
- *i, representa l'índex de totes les dades utilitzades per a la realització del model (575 mostres).*

	Diferència de color Promig	Diferència de color Màxim
dL	3,44	15,22
da	3,12	10,15
db	13,53	74,92

Taula 4 – Resultats (dos il·luminats)

3.7.3 Colorímetre amb tres il·luminats

Per a la generació d'aquest colorímetre s'ha escollit, a més del LED verd i el LED vermell (per les raons esmentades anteriorment) el LED blau, per obtenir més informació de la mostra en les zones on la longitud d'ona és menor i així ampliar el rang de visió de l'instrument. El problema principal d'aquest colorímetre és que hi ha encara la degradació de la informació al voltant dels 590 nm.

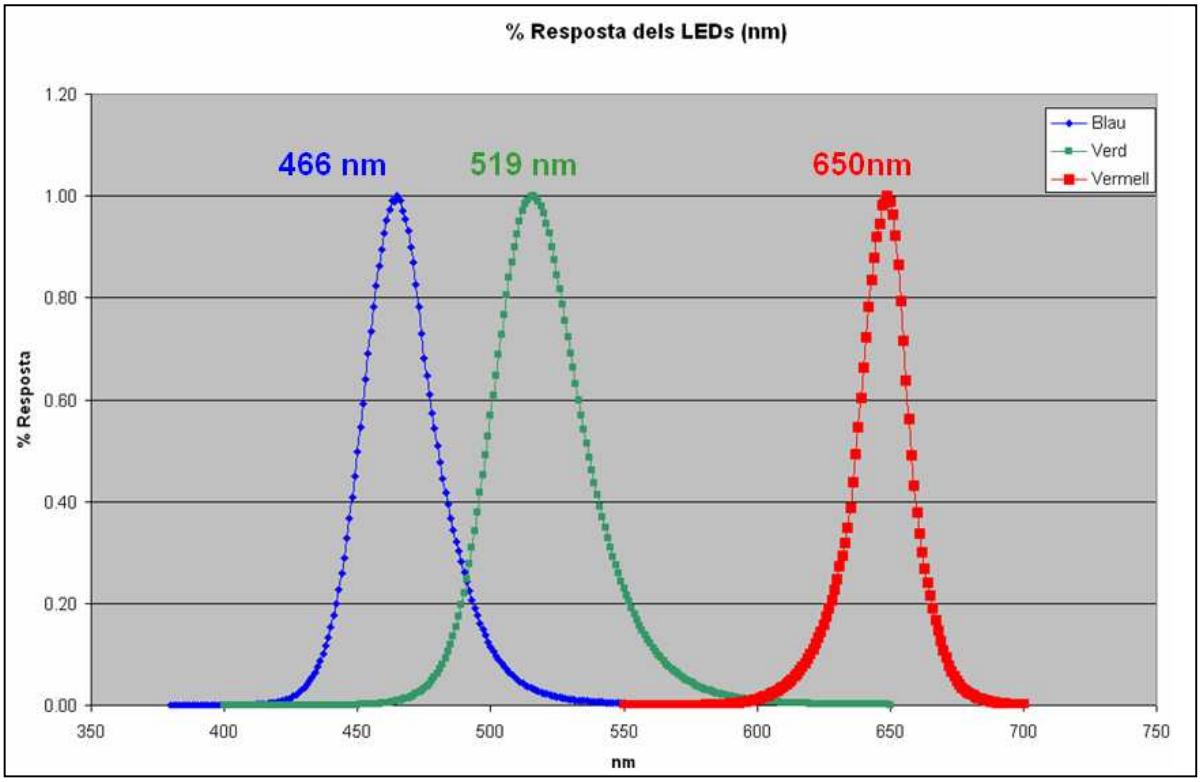


Figura 26 – Espectre dels 3 il·luminants

Aplicant el model amb els tres il·luminats obtenim:

$$\begin{bmatrix} L_i^* & a_i^* & b_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_i & V_i & R_i & B_i^2 & V_i^2 & R_i^2 & B_iV_i & V_iR_i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 22.43 & 6.18 & -168.67 \\ 115.07 & -154.87 & 163.04 \\ 75.22 & 120.77 & 32.54 \\ -5.13 & -8.15 & 87.08 \\ -30.58 & 59.11 & -38.80 \\ -39.73 & -23.27 & -22.52 \\ -28.32 & 33.24 & -76.31 \\ -18.45 & -39.13 & 37.18 \end{bmatrix}$$

A on:

- *L^*_i, a^*_i y b^*_i, són les dades adquirides de l'instrument professional.*
- *V, és resposta relativa al blanc de referència del dispositiu, il·luminant la mostra a mesurar, amb el LED verd (CVm/CVb).*
- *R, és resposta relativa al blanc de referència del dispositiu, il·luminant la mostra a mesurar, amb el LED vermell (CRm/CRb)*
- *B, és resposta relativa al blanc de referència del dispositiu, il·luminant la mostra a mesurar, amb el LED blau (CBm/CBb).*
- *CBm són les comptes del conversor A/D de la mostra a mesurar quan és il·luminada amb el LED blau.*
- *CBb són les comptes del conversor A/D del blanc de referència quan és il·luminada amb el LED blau.*
- *i, representa l'índex de totes les dades utilitzades per a la realització del model (575 mostres).*

	Diferència de color Promig	Diferència de color Màxim
dL	3,25	14,99
da	1,78	8,16
db	2,00	10,08

Taula 5 – Resultats (tres il·luminants)

3.7.4 Colorímetre amb quatre il·luminants

Per a la generació d'aquest colorímetre s'utilitzen totes les dades que dóna l'instrument proporcionat. Amb la inserció del quart LED, podem eliminar el problema que teníem amb la pèrdua de precisió degut a la falta de informació a la zona de grocs. Amb el quart LED, podem augmentar la resolució treslladant el problema de falta de informació als extrems de l'espectre visible (per sota de 475nm i per sobre de 680nm); hi ha un problema als voltants de 575nm a on hi ha pèrdua de precisió, degut a que podem extreure poca informació.

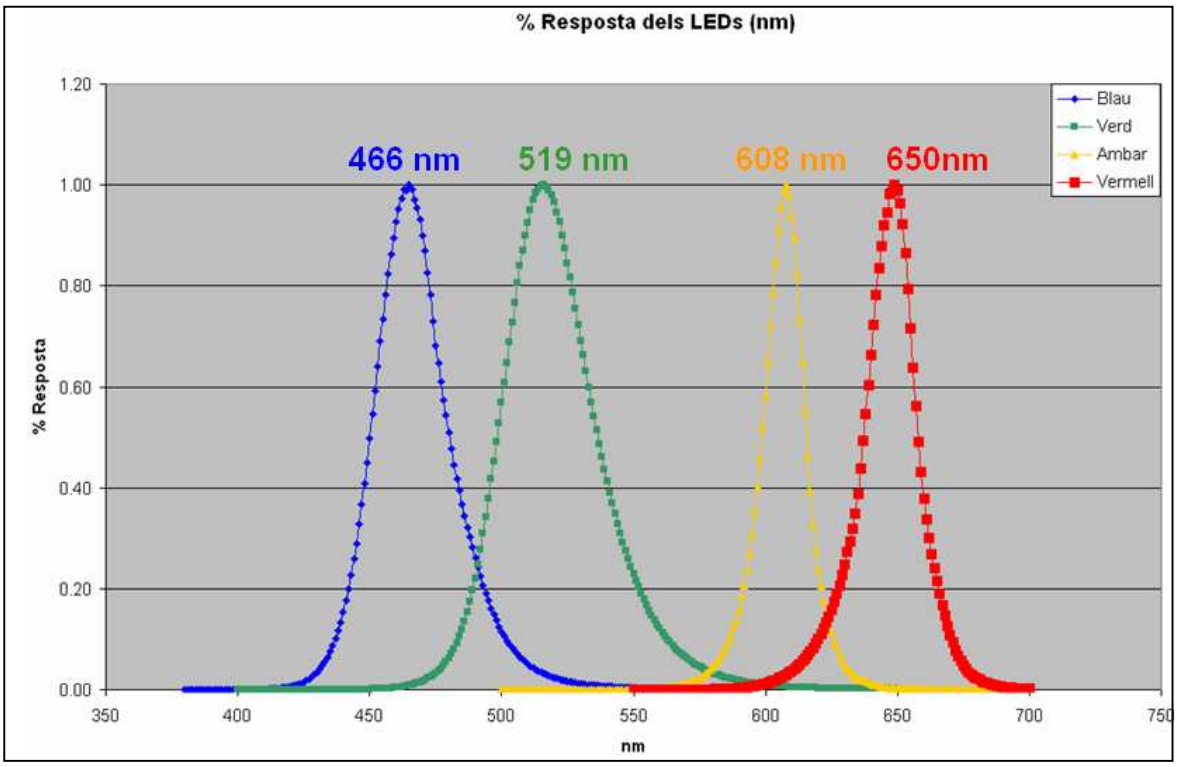


Figura 27 – Espectre dels 4 il·luminants

Aplicant el model amb els quatre il·luminants obtenim:

$$\begin{bmatrix} L_i^* & a_i^* & b_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_i & V_i & G_i & R_i & B_i^{\,2} & V_i^{\,2} & G_i^{\,2} & R_i^{\,2} & B_i V_i & V_i G_i & G_i R_i \end{bmatrix} * MOORE4$$

A on:

- *L^*_i, a^*_i y b^*_i, són les dades adquirides de l'instrument professional.*
- *V, és resposta relativa al blanc de referència del dispositiu, il·luminant la mostra a mesurar, amb el LED verd (CVm/CVb).*
- *R, és resposta relativa al blanc de referència del dispositiu, il·luminant la mostra a mesurar, amb el LED vermell (CRm/CRb)*
- *B, és resposta relativa al blanc de referència del dispositiu, il·luminant la mostra a mesurar, amb el LED blau (CBm/CBb).*
- *G, és resposta relativa al blanc de referència del dispositiu, il·luminant la mostra a mesurar, amb el LED Groc (CGm/CGb).*
- *CGm són les comptes del conversor A/D de la mostra a mesurar quan és il·luminada amb el LED groc.*
- *CGb són les comptes del conversor A/D del blanc de referència quan és il·luminada amb el LED groc.*
- *i, representa l'índex de totes les dades utilitzades per a la realització del model (575 mostres).*

$$- \textit{MOORE4} = \begin{bmatrix} 30{,}07 & 6{,}25 & -173{,}42 \\ 94{,}49 & -159{,}61 & 164{,}33 \\ -96{,}63 & 138{,}01 & 19{,}82 \\ 170.32 & 15.46 & 24{,}90 \\ -5{,}73 & -11{,}91 & 79{,}85 \\ -16{,}68 & 61{,}75 & -40{,}44 \\ 432{,}16 & 182{,}32 & -155{,}48 \\ 35{,}89 & 163{,}10 & -142{,}51 \\ -27{,}85 & 41{,}34 & -55{,}19 \\ -48{,}23 & -60{,}90 & 15{,}84 \\ -455{,}60 & -379{,}09 & 277{,}25 \end{bmatrix}$$

	Diferència de color Promig	Diferència de color Màxim
dL	2,95	15,29
da	1,09	5,11
db	2,25	6,22

Taula 6 – Resultats (quatre il·luminants)

3.7.5 Observació de resultats

Mitjançant el test realitzat a l'apartat anterior (colorímetres amb diferent nombre d'il·luminants) n'hem extret els promitjos de les diferències de colors (CIEDE76, CIEDE94 i CIEDE2000) i s'ha realitzat el següent gràfic:

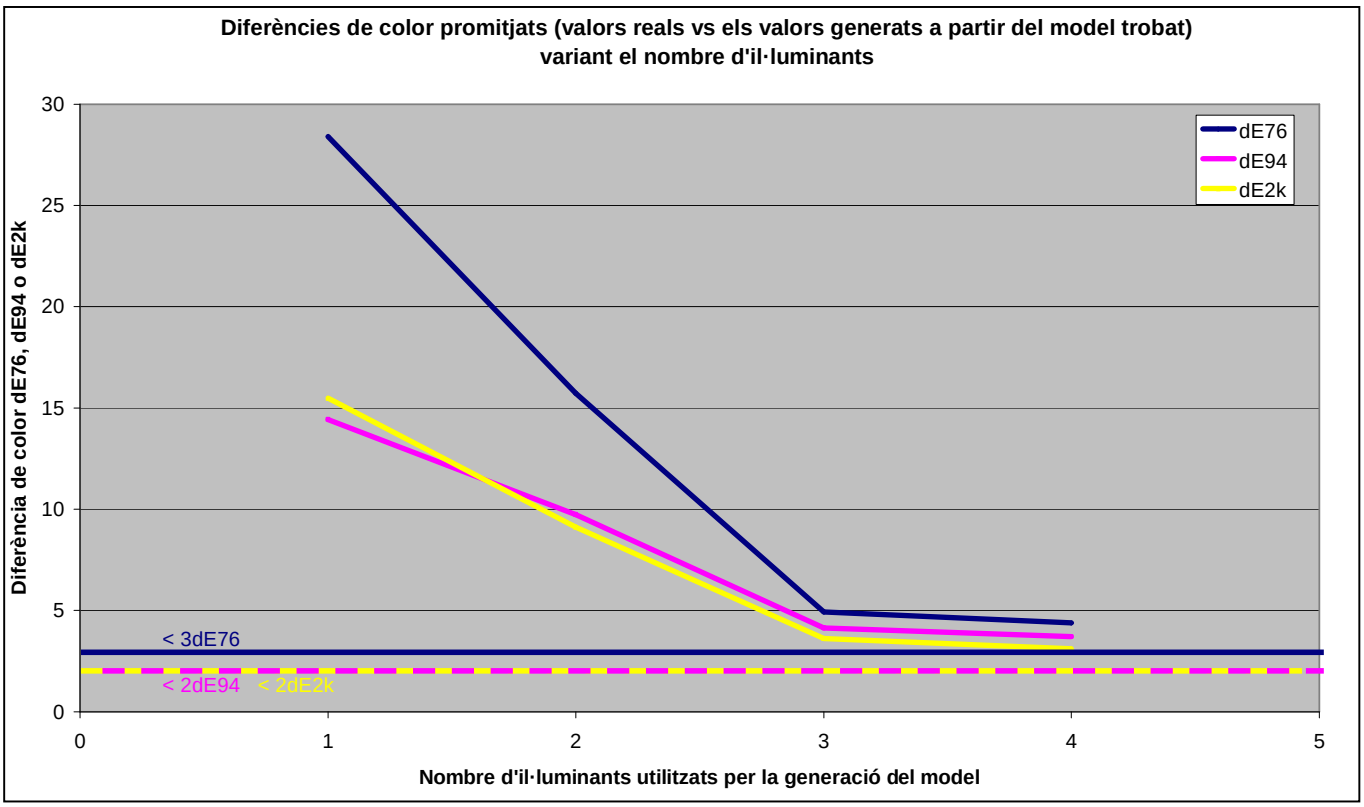


Figura 28 – Diferència de color (dEs) dels valors reals versos els valors generats pels diferents models

Podem dir que amb els resultats obtinguts fins ara queda demostrat que amb aquest mètode no serviria per fer un colorímetre de l'instrument proporcionat, degut a que els valors promitjats en cap cas cauen per sota dels màxims admesos (mostrats a la gràfica amb el mateix color que la recta).

Per intentar millorar aquest mètode podem observar a on es produeix el problema observant la gràfica següent, podem determinar quin paràmetre és el que mostra pitjor resposta.

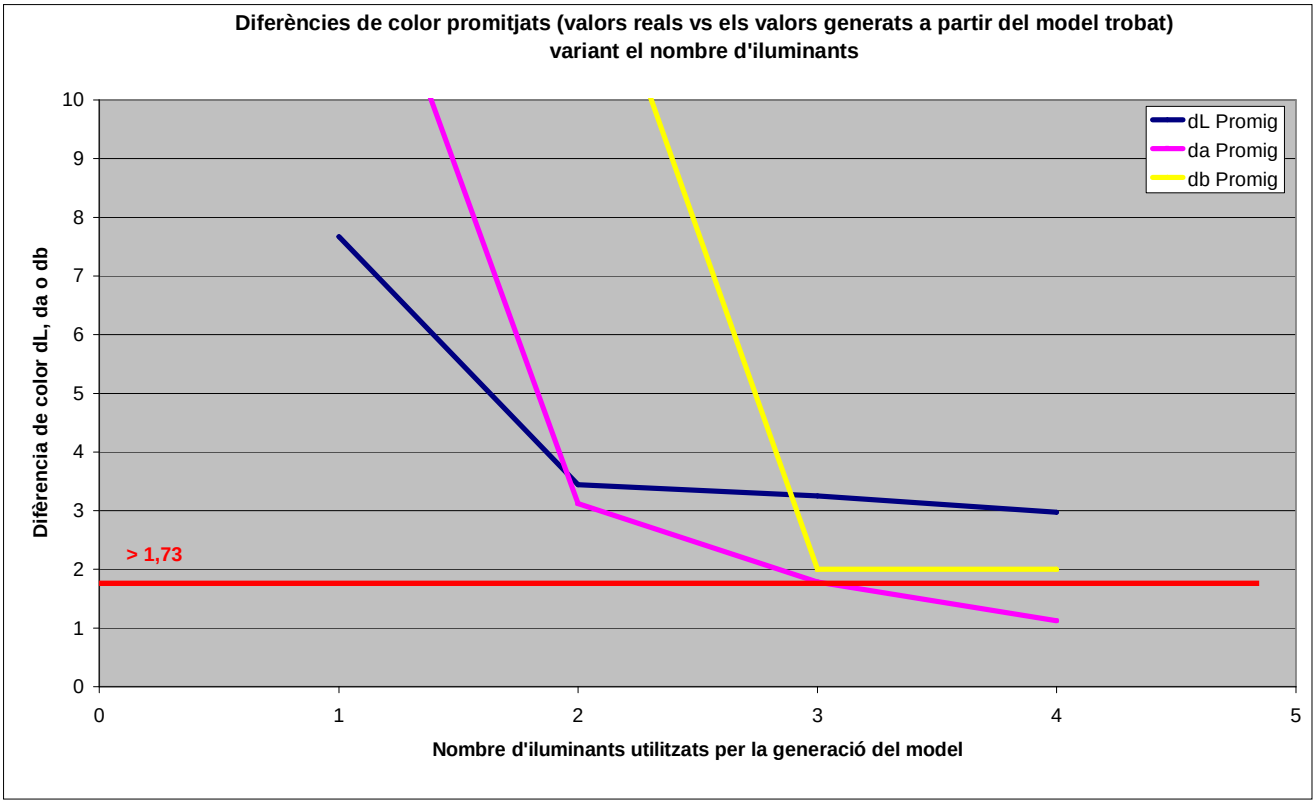


Figura 29 – Diferència de color (dL, da i db) respecte el nombre d'il·luminants utilitzats

Veiem que el paràmetre que produeix el major error és degut a la L* i seguidament la b*. El model trobat per a* està dins del rang acceptable com a vàlid. Això segurament es deu, que a la zona de grocs i blaus hi ha una important pèrdua de informació. Observi el gràfica adjunt, a on es mostra clarament el buit que hi ha d'informació, recordant que el paràmetre b* és el que dóna la quantitat de groc que té una mostra, per valors positius, i la quantitat que té de blau, per valors negatius, coincideix amb el paràmetre que dóna major error, el db. Pel que fa a la L*, és degut a la falta de informació total, cal sumar le falta de informació a extreure a la zona de verds (entre el LED groc i el LED verd) i també a la zona més pròxima a la infraroja, a on també es perd molta informació.

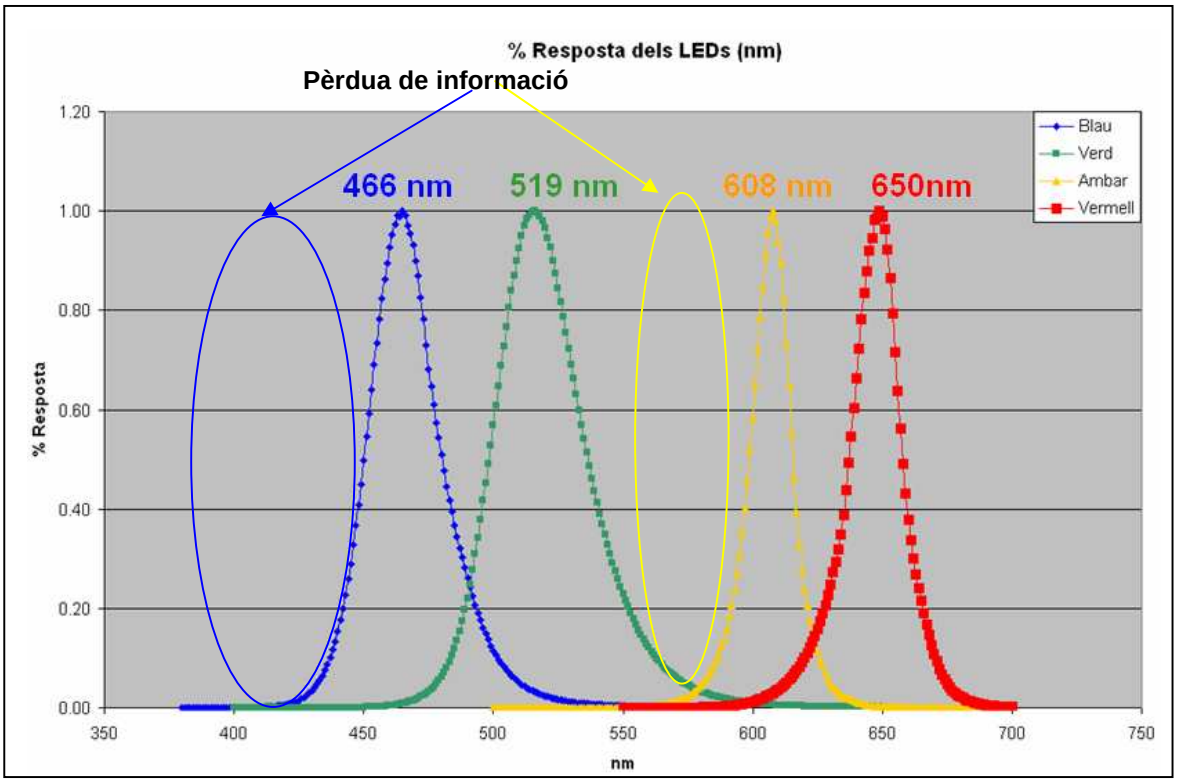


Figura 30 – Major pèrdua de informació

En el següent apartat s'intentarà millorar la resposta dels dos paràmetres que estan empitjoraran la resposta del colorímetre, mitjançant millorar el model matemàtic trobat.

3.8 Model definitiu

En aquest apartat es pretén millorar el model adquirit a l'apartat anterior. Observant la diferència de color dL, da i db, veiem que el valor da, pot ser acceptat (està per sota de 1,73); però pel que fa als valors L i b estan fora dels rangs acceptables.

Per a millorar el càlcul de L* (si aconseguim reduir L* aconseguirem reduir dE), s'ha trobat, que dividint la suma dels quatre LEDs, per la resposta de cada LED, dóna uns millors resultats, l'error promig és el més baix trobat. Serà necessari posar la suma, a la matriu d'entrada de l'algoritme, per no perdre informació, per tan:

$$L_i^* = BVGR_{Li} * MOORE_L \qquad \textbf{Equació 13}$$

Calculant la matriu pseudoinversa amb Matlab, s'obté la matriu $MOORE_L$.

A on:

- $BVGR_{Li}=\left[\frac{B_i}{suma_i} \quad \frac{V_i}{suma_i} \quad \frac{G_i}{suma_i} \quad \frac{R_i}{suma_i} \quad \left(\frac{B_i}{suma_i}\right)^2 \quad \left(\frac{V_i}{suma_i}\right)^2 \quad \left(\frac{G_i}{suma_i}\right)^2 \quad \left(\frac{R_i}{suma_i}\right)^2 \quad suma_i \quad suma_i^2\right]$
- *B, resposta del sensor il·luminant amb el LED blau.*
- *V, resposta del sensor il·luminant amb el LED verd.*
- *G, resposta del sensor il·luminant amb el LED groc.*
- *R, resposta del sensor il·luminant amb el LED vermell.*
- $suma_i = B_i + V_i + G_i + R_i$
- *L_i^* són totes les L^* de les mostres provenint de l'instrument professional.*
- *i, representa l'índex de totes les dades utilitzades per a la realització del model (575 mostres).*
- $MOORE_L = \begin{bmatrix} 88{,}18 \\ 495{,}77 \\ -95{,}23 \\ -302{,}16 \\ -235{,}04 \\ -991{,}70 \\ 245{,}96 \\ 507{,}29 \\ 38{,}54 \\ -4{,}89 \end{bmatrix}$

Donant com valor promig dL = 0,88; aquests sí són uns bons resultats. Amb aquest mètode millorem el paràmetre L* fins arribar als valors acceptables.

Pel càlcul de a*, el deixem amb el mateix mètode que hem trobat en l'apartat anterior per tan tenim:

$$a_i^* = BVGR_{a\,i} * MOORE_a \qquad \textbf{Equació 14}$$

A on:

- $MOORE_a = \begin{bmatrix} 6{,}25 \\ -159{,}61 \\ 138{,}01 \\ 15{,}46 \\ -11{,}91 \\ 61{,}75 \\ 182{,}32 \\ 163{,}10 \\ 41{,}34 \\ -60{,}90 \\ -379{,}09 \end{bmatrix}$
- $BVGR_{ai} = \begin{bmatrix} B_i & V_i & G_i & R_i & B_i^2 & V_i^2 & G_i^2 & R_i^2 & B_iV_i & V_iG_i & G_iR_i \end{bmatrix}$
- *B, resposta del sensor il·luminant amb el LED blau.*
- *V, resposta del sensor il·luminant amb el LED verd.*
- *G, resposta del sensor il·luminant amb el LED groc.*
- *R, resposta del sensor il·luminant amb el LED vermell.*
- *i, representa l'índex de totes les dades utilitzades per a la realització del model (575 mostres).*

I pel càlcul de b*, hem intentat millorar-lo amb el mètode utilitzat pel valor L*, i ens dóna un valor acceptable de 1,69 db. Tenim doncs:

$$b_i^* = BVGR_{bi} * MOORE_b \qquad \textbf{Equació 15}$$

A on:

- $BVGR_{bi} = \begin{bmatrix} \frac{B_i}{suma_i} & \frac{V_i}{suma_i} & \frac{G_i}{suma_i} & \frac{R_i}{suma_i} & \left(\frac{B_i}{suma_i}\right)^2 & \left(\frac{V_i}{suma_i}\right)^2 & \left(\frac{G_i}{suma_i}\right)^2 & \left(\frac{R_i}{suma_i}\right)^2 & suma_i & suma_i^2 \end{bmatrix}$

- *B, resposta del sensor il·luminant amb el LED blau.*
- *V, resposta del sensor il·luminant amb el LED verd.*
- *G, resposta del sensor il·luminant amb el LED groc.*
- *R, resposta del sensor il·luminant amb el LED vermell.*
- $suma_i = B_i + V_i + G_i + R_i$
- b_i^* *són totes les* b^* *de les mostres provenint de l'instrument professional.*
- *i, representa l'índex de totes les dades utilitzades per a la realització del model (575 mostres).*

$$- \ MOORE_b = \begin{bmatrix} -42{,}43 \\ 32{,}35 \\ 16{,}51 \\ 31{,}21 \\ 69{,}01 \\ -10{,}20 \\ -134{,}62 \\ -101{,}03 \\ 44{,}58 \\ 3{,}12 \end{bmatrix}$$

Amb el model trobat obtenim, de les dades utilitzades per a realitzar-lo, la següent taula:

	575 mostres					
	dL	da	db	dE76	dE94	dE2000
Promig	0,88	1,09	1,69	2,65	1,73	1,83
Màxim	8,19	7,00	8,57	9,64	9,39	6,74

Taula 7 – Resultats del model definitiu

Aquesta taula només ens diu que el model trobat s'adequa a les dades que s'han utilitzat per a realitzar-lo. Per a la validació del model, serà necessari utilitzar-lo amb altres mesures que no s'hagin utilitzat per a la seva elaboració. En el següent apartat s'intentarà validar el model per, o bé acceptar com a vàlid el model trobat, o bé per desestimar-lo.

3.9 Verificació del model

Per a verificar el correcte funcionament de l'algoritme és necessari utilitzar dades que no siguin les que s'han utilitzat per fer el model. S'ha optat per mesurar mostres que siguin de una altra superfície a mesurar però amb el mateix patró imprès.

Utilitzant el model trobat a l'apartat anterior s'han obtingut els resultats següents:

	150 mostres					
	Diferències de color			CIEdE		
	dL	da	db	dE76	dE94	dE2000
Promig	0,99	1,05	1,26	2,46	1,61	1,70
Màxim	6,42	5,04	6,36	8,13	6,72	5,67

Taula 8 – Validació de l'algoritme mitjançant el mètode trobat

Els resultats han sigut prou bons i per tant, amb aquest, mètode podem acceptar com a vàlid el model trobat.

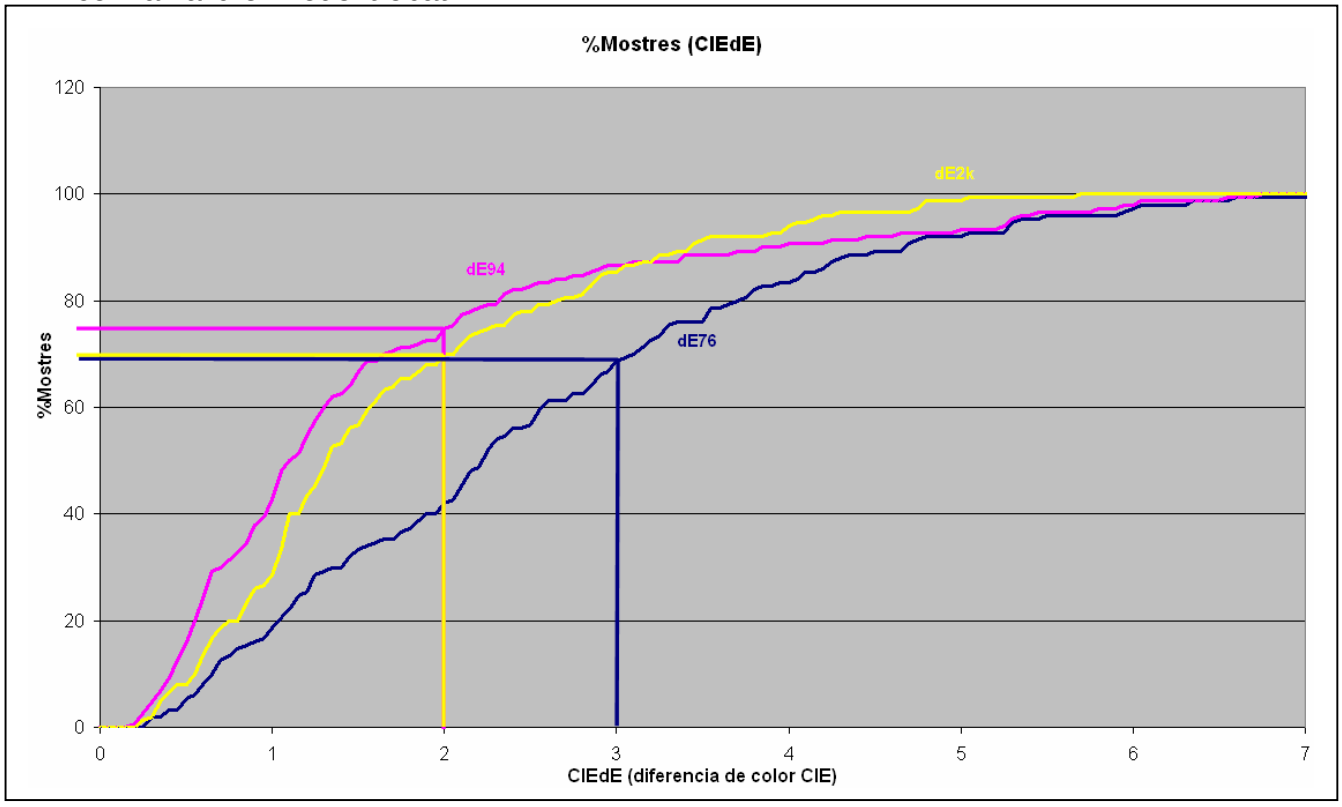


Figura 31 - Percentatge de Mostres acceptables

Per tant l'instrument proporcionat pot treballar com a un colorímetre de baix cost, específic pels patrons que s'han utilitzat per fer-lo; aquest instrument proporcionat no serviria per treballar com l'instrument professional.

4. Conclusions

Amb els resultats obtinguts del test podem veure que el 70% de les mesures són bones, mentre que la resta es poden considerar com aproximacions.

Consideracions a tenir en compte perquè el colorímetre funcioni correctament:

- Perquè el colorímetre treballi amb els seu òptim funcionament ha de ser calibrat amb la peça de plàstic 2 que s'ha detallat abans, per tant s'haurà de tenir en compte en el cost del dispositiu, fent-lo augmentar fins a uns 11 euros aproximadament.
- Abans de fer cap calibració o mesura, cal esperar mig minut per cada LED, perquè aquests arribin a la temperatura nominal i la mostra no variï degut a aquest afecte.
- L'instrument ha estat dissenyat per mesurar un tipus de patró, per tant les mostres a mesurar hauran de ser similars a aquestes.
- El fet de generar un algoritme per cada instrument, no és res més que trobar els coeficients de la matriu de Moore-Penrose, de manera que cada algoritme compensarà les variabilitats que cada instrument pot presentar.

Tenint tot això en compte, l'instrument de mesura cal que estigui a temperatures de treball d'entre 15º i 25º Celcius, i que la humitat relativa estigui als valors del 50% ±10%. Cal que estigui en un espai tancat per evitar ràfegues de vent per evitar que les partícules de pols es vagin dipositant en el temps a la mostra de referència embrutant-la i per tant modificant els paràmetres colorimètrics. És per això, que recomanaria utilitzar la càpsula de protecció que la peça de referència ja porta de fàbrica i que només es destapi en el moment de calibrar l'instrument.

Observi la taula següent a on s'enumeren les característiques del colorímetre dissenyat:

Paràmetres colorimètrics:		L*, a*, b*
Il·luminant:		D50, 2 graus, any CIE 1964
Error promig	dE76:	< 2,5
	dE94:	< 1,7
	dE2000:	< 1,7

Taula 9 – Característiques del colorímetre dissenyat

El model del colorímetre trobat no pot ser en cap cas un instrument professional, perquè aquest dispositiu pugui fer aquest pas, cal que els valors màxims dE76, dE94 i dE2k, tots, estiguin per sota 1 dEs i que el seu error promig sigui per sota de 0,5 dEs. En aquesta llista es mostren vàries possibles millores per fer-ne un colorímetre professional:

- Observant l'evolució del gràfic de la diferència de color respecte els valors reals versos els valors generats a partir del model variant el nombre d'il·luminants, podem veure que és necessari incrementar el nombre d'il·luminants, ens cal més informació de la mostra per millorar la resolució espectral.
- Augmentant el nombre d'il·luminants fins a 5 podríem disminuir els valors promitjos però segurament els valors màxims realitzats no complirien els requisits de < 1,5 dE.
- Augmentant el nombre d'il·luminants fins a 6 podríem disminuir els valors promitjos i s'hauria de veure els valors màxim si complirien la condició < 1dE.
- També recomanaria utilitzar uns patrons ceràmics/plàstics, per tant, no impresos (per evitar les derives en el temps, degut a l'evaporació de les tintes i els canvis que pot provocar el paper) i també per evitar que el model trobat s'adapti a les condicions del paper i la tinta fent així que l'instrument només pogui ser utilitzat en aquestes condicions. Si es realitzés mitjançant patrons estables i totalment independents podríem obtenir, a més de les modificacions anteriors, un colorímetre professional absolut (sense referenciar-lo amb cap altre instrument professional).

5. Bibliografia

Articles:

- IS&T: The Society for Imaging Science and Technology (2007) High Dynamic Range Multispectral System for Wide Color Gamut Measurements. 3rd European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision. ISBN/ISSN: 0-89208-262-3 – Primera edició, 2007.
- Arjona M., de Lasarte, M., Pujol J., i Vilaseca M. (2007). Evaluación de la resposta colorimétrica de un sistema. En: Actas del VIII Congreso Nacional del Color (p. 97-98) ISBN/ISSN: 978-84-611-8035-6
- Arjona M., de Lasarte, M., Pujol J., i Vilaseca M. (19, 20 i 21 de setembre de 2007). Estudio de la influencia del tamaño del conjunto de entrenamiento en la medida del color mediante sistemas multiespectrales. VIII Congreso Nacional del Color.
- Arjona M., de Lasarte, M., Pujol J., i Vilaseca M. (2006). Color measurements with colorimetric and multispectral imaging systems. En: SPIE Proceedings Spectral Imaging: Eigth Internacional Symposium on Multispectral Color Science. SPIE, p. F01-F11. ISBN/ISSN: 0-8194-6102-4

Internet:

- http://planetmath.org/encyclopedia/Pseudoinverse.html: mètodes matemàtics.
- http://www.colorwiki.com/wiki/Delta_E:_The_Color_Difference
- http://www.dicciomed.es: termes científics.
- http://www.diycalculator.com/sp-cvision.shtml: Utilitzat en la introducció.
- http://www.easyrgb.com/index.php?X=CALC
- http://www.nxp.com/acrobat_download/literature/9398/39340011.pdf: bus I^2C.
- http://www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/index-e.html: Il·lustracions i curiositats.
- http://www.xrite.com/product_overview.aspx?ID=812: dispositius colorimètrics.
- http://www.wikipedia.org: Utilitzat en tot el projecte.

Llibres:

- HUNT, Robert William Gainer. The reproduction of colour. 6ena edició. Barcelona: Wiley, 2004. num. pàgines 702. ISBN 0-470-02425-9.
- HUNT, Robert William Gainer. Measuring colour. 2ona edició. Inglaterra: Ellis Horwood, 1995. num. pàgines 307. ISBN 0-13-567686-X.
- BASS, Michael. *Fundamentals, Techniques, & design*. 2ona edició. Nova York: McGraw-Hill, 1995. num. pàgines 635. (Handbook of Optics; Volum I). ISBN 0-07-047740-X.

A. ANNEX I – Glossari

Candela (símbol: cd): és una de les set unitats bàsiques del SI. És la intensitat lumínica, en una direcció determinada, d'una font que emet radiació monocromàtica de freqüència 540 × 10^{12} Hz i que té en aquesta direcció una intensitat radiant de (1/683) W per estereoradiant (1 cd = 1/683 w.sr).

Densitat: és la quantitat de llum que hi ha en un espai volumètric determinat, sense distinció del croma (el croma és els diferents colors que es poden distingir), la unitat segons CIE és la L* o lluminositat.

Estereoradiant (símbol: sr): és la unitat de l'angle sòlid del SI. S'utilitza per a descriure intervals angulars en un espai tridimensional, de manera anàloga a la manera en què el radiant descriu angles en un pla matemàtic.

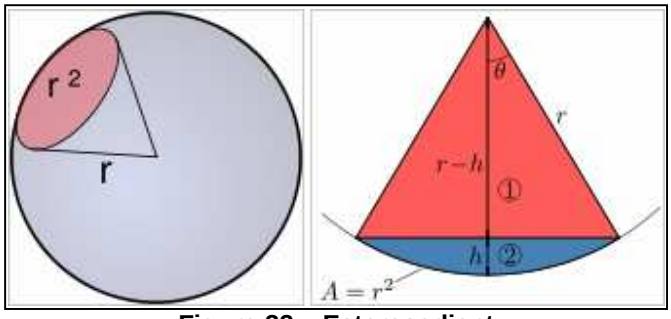


Figura 32 – Estereoadiant

Flux lluminós: o corrent de fotons que emet una font de llum puntual d'una candela d'intensitat en un estereoradian, la unitat en SI lumen (lm = 1 cd.sr).

Font de llum: és un dispositiu radiatiu de llum visible, l'espectre de llum es correspon a l'il·luminat que conté.

Il·luminant: és un tipus de llum, definit pel seu espectre i són coneguts internacionalment. N'hi ha de varis tipus: A que representa la llum mitjana incandescent, B i C (derivats de A) que representen, la llum solar directe i la llum promitjada diürna, respectivament; els diferents il·luminants D que representen les diferents fases diürnes; l'il·luminant E que representa distribució d'energia constant i per últim, però no menys importants, els diferents il·luminants F, els quals representen diferents llums fluorescents depenent de la seva composició química.

Lluminància: es defineix com la densitat angular i superficial de flux lluminós que incideix, travessa o emergeix d'una superfície seguint una direcció determinada, la unitat és una candela per stereoradiant en una superfície determinada (cd · sr · m^{-2}).

Lluminositat o il·luminació: és la quantitat de potència lumínica (energia per unitat de temps) emesa en totes direccions per una font de llum, la unitat en SI és el lux (1 lx = 1 lm/m^2= 1 cd.sr/m^2).

Radiància: es una mesura radiomètrica de tota la llum en una àrea. La seva unitat segons SI és el W per stereoradiant per metre quadrat ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$). Es calcula amb la suma (o integral) de tota les radiàncies espectrals d'una superfície. És molt útil perquè indica, de la potència emesa per una font o d'una superfície que reflexa la llum, la potència que és rebuda per un sistema òptic que observa la superfície des d'un angle determinat.

Reflectància: és, per definició, la quantitat de llum que emet una superfície que és il·luminada per una font de llum. Es representa espectralment i la seva unitat és el percentatge (%) de tota la llum que pot rebre, en funció de la longitud d'ona que es rep en nm, segons el sistema internacional (SI).

Radiància espectral: és una mesura radiomètrica que descriu tota la llum que passa a través o és emesa des d'una àrea en particular i cau amb un angle sòlid en una direcció específica. Unitat segons SI és $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$.

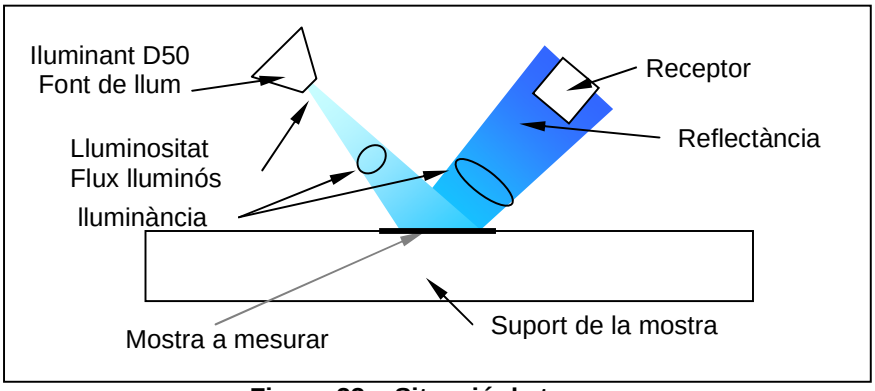


Figura 33 – Situació de termes

B. ANNEX II – CÀLCULS

B.1. Càlcul XYZ

Càlcul dels tres estímuls X, Y i Z d'una mostra:

$$X = \int_{380}^{730} I(\lambda)x(\lambda)R(\lambda)d\lambda$$ ***Equació 16***

$$Y = \int_{380}^{730} I(\lambda)y(\lambda)R(\lambda)d\lambda$$ ***Equació 17***

$$Z = \int_{380}^{730} I(\lambda)z(\lambda)R(\lambda)d\lambda$$ ***Equació 18***

A on:

- *λ longitud d'ona*
- *I (λ) resposta espectral de l'il·luminant, D50.*
- *x (λ) resposta espectral dels tres estímuls en vermells.*
- *y (λ) resposta espectral dels tres estímuls en verds.*
- *z (λ) resposta espectral dels tres estímuls en blaus.*
- *R(λ) reflectància espectral de la mostra.*
- *X estímul vermell de la mostra.*
- *Y estímul verd de la mostra.*
- *Z estímul blau de la mostra.*

X, Y i Z poden ser màxims i donen lloc a XN, YN i ZN. Això passarà quan la superfície a mesurar tingui una reflectància total, és a dir que tota la llum que emet la font de llum rebota i incideix al fotosensor. Aquest valors XN, YN i ZN ens serviran per fer la conversió d'espai XYZ a altres espais de color.

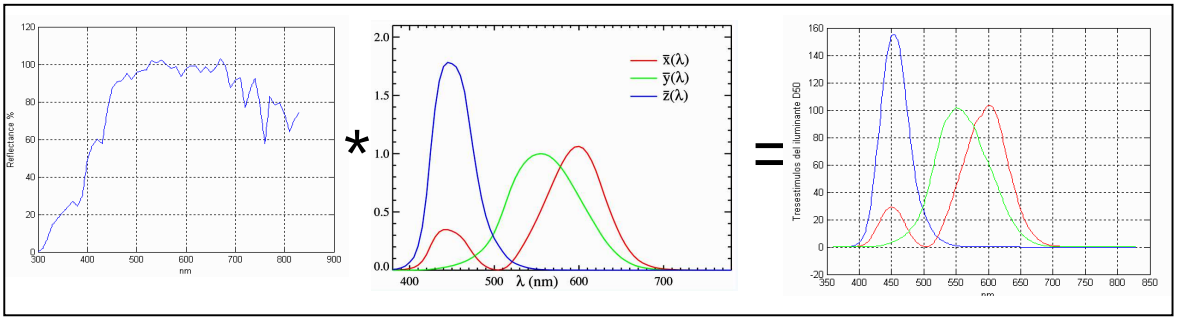


Figura 34 –A. Il·luminant D50 B. Tres estímuls XYZ (CIE1931) C. XYZ d'una mostra

Càlcul de XN, YN y ZN (XYZ de l'il·luminat D50):

$$XN = \int_{380}^{730} I(\lambda)x(\lambda)d\lambda$$ ***Equació 19***

$$YN = \int_{380}^{730} I(\lambda)y(\lambda)d\lambda$$ ***Equació 20***

$$ZN = \int_{380}^{730} I(\lambda)z(\lambda)d\lambda$$ ***Equació 21***

A on:

- *λ longitud de onda*
- *I (λ) resposta espectral de l'il·luminat, en el nostre cas D50.*
- *x (λ) resposta espectral de les tres estímuls en vermells.*
- *y (λ) resposta espectral de les tres estímuls en verds.*
- *z (λ) resposta espectral de les tres estímuls en blaves.*
- *XN, estímul X (vermell) de l'il·luminant (D50).*
- *YN, estímul Y (verd) de l'il·luminant (D50).*
- *ZN, estímul Z (blau) de l'il·luminant (D50).*

B.2. Conversió d'espai CIE1931 (XYZ) a CIE xyY (xyz Y)

En l'espai xyY no es representa la lluminància, només es presenta el croma. La z de l'espai xyY i la Y no es representen, la z és una combinació lineal dels paràmetres x i y i la Y és la mateix pels dos espais.

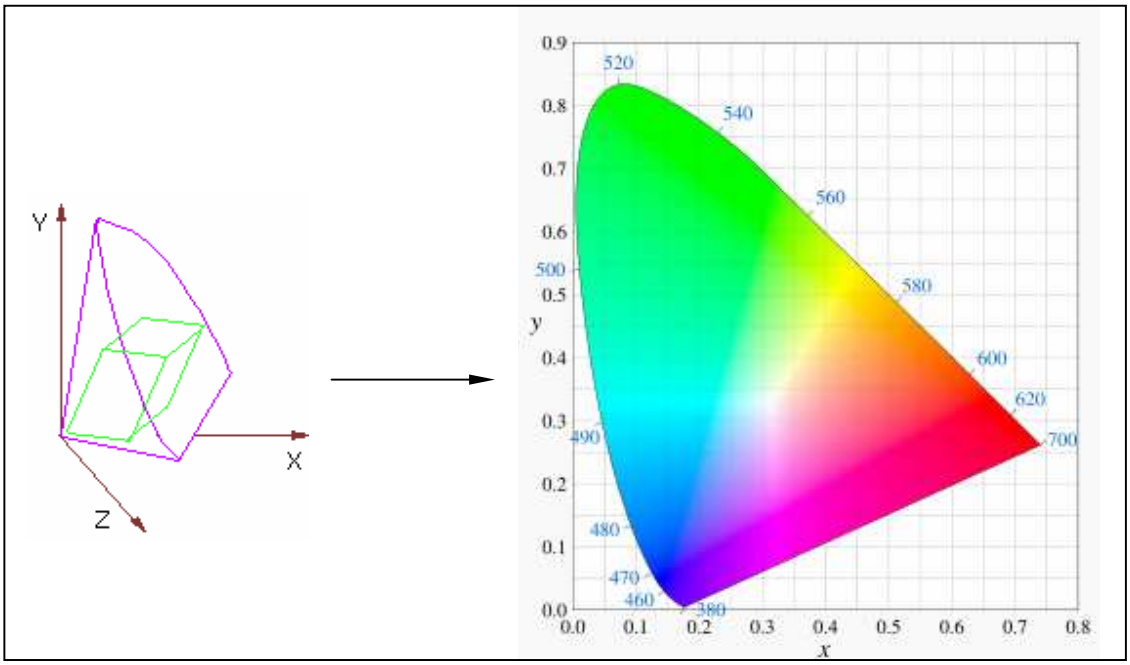


Figura 35 – Conversió d'espais XYZ a xyY

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$ ***Equació 22***

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$ ***Equació 23***

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = \frac{Y}{y}(1 - x - y)$$ ***Equació 24***

$$Y = Y$$ ***Equació 25***

A on:

- *X, estímul X (vermell) de la mostra a mesurar.*
- *Y, estímul Y (verd) de la mostra a mesurar.*
- *Z, estímul Z (blau) de la mostra a mesurar.*
- *x, paràmetre cromàtic.*
- *y, paràmetre cromàtic.*
- *z, paràmetre cromàtic.*

B.3. Conversió d'espai CIE xyY a CIE 1931 (XYZ)

La z de l'espai xyY no s'utilitza, doncs és combinació lineal dels paràmetres x i y.

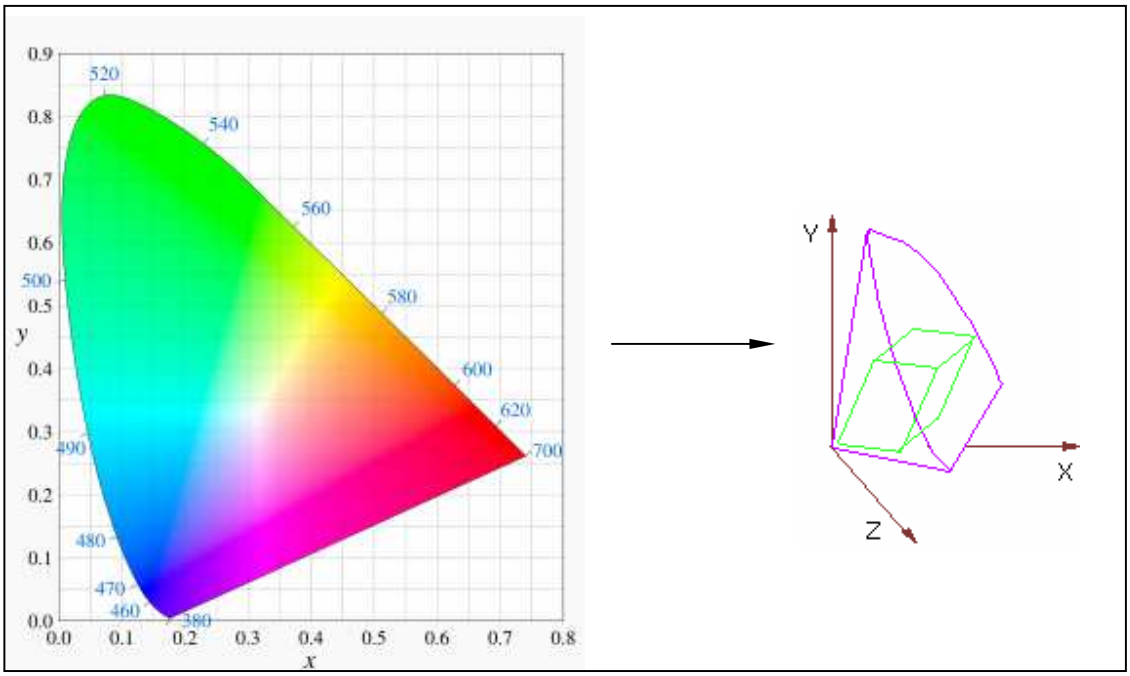


Figura 36 – Conversió d'espais xyY a XYZ

$$X = \frac{Y}{y}x$$ ***Equació 26***

$$Z = \frac{Y}{y}(1-x-y)$$ ***Equació 27***

$$Y = Y$$ ***Equació 28***

A on:

- *X, estímul X (vermell) de la mostra a mesurar.*
- *Y, estímul Y (verd) de la mostra a mesurar.*
- *Z, estímul Z (blau) de la mostra a mesurar.*
- *x, paràmetre cromàtic.*
- *y, paràmetre cromàtic.*

B.4. Conversió d'espai XYZ a CIELab

L'espai CIELab o Lab és l'espai de color amb influència de l'il·luminant que s'està utilitzant.

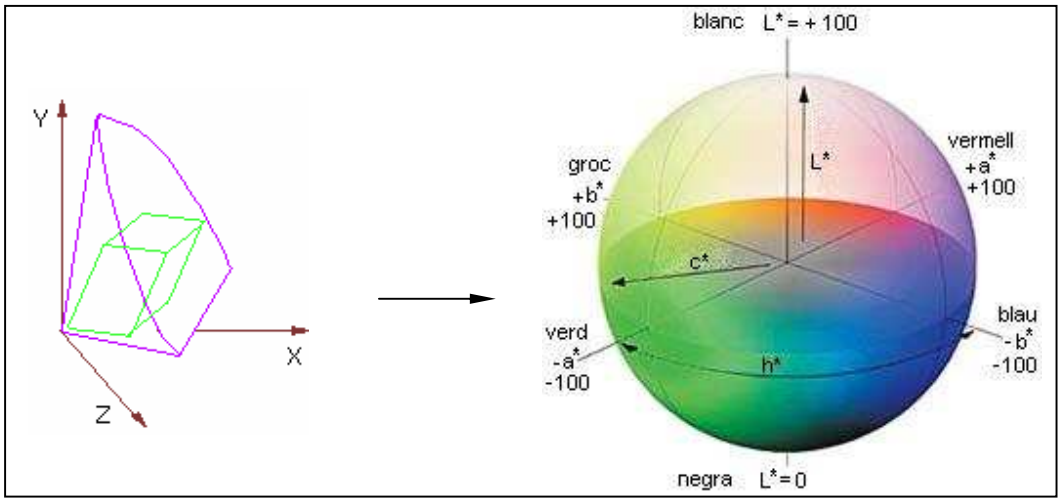


Figura 37 – Conversió d'espai XYZ a Lab

Els valors Lab, són les coordenades cartesianes de l'espai CIELab. Càlcul de CIELab, L*, a* i b* o Lab:

$$L^* = 116 * f\left(Y/_{YN}\right) - 16 \qquad \textit{Equació 29}$$

$$a^* = 500\left[f\left(X/_{XN}\right) - f\left(Y/_{YN}\right)\right] \qquad \textit{Equació 30}$$

$$b^* = 200\left[f\left(Y/_{YN}\right) - f\left(Z/_{ZN}\right)\right] \qquad \textit{Equació 31}$$

A on:

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} si \quad t > 0.008856 \\ 7.787t + 16/116 \quad si \quad t < 0.008856 \end{cases}$$

- *XN, estímul X (vermell) de l'il·luminant (D50).*
- *YN, estímul Y (verd) de l'il·luminant (D50).*
- *ZN, estímul Z (blau) de l'il·luminant (D50).*
- *X, estímul X (vermell) de la mostra a mesurar.*
- *Y, estímul Y (verd) de la mostra a mesurar.*
- *Z, estímul Z (blau) de la mostra a mesurar.*

- L valor que està dins l'interval de 0 a 100. 0 Significa que la mostra és negra, no hi ha llum, i 100, significa que la mostra és blanca, arriba tota la llum de l'il·luminant*

- a, valor que està entre -100 i +100. Per valors negatius la mostra tendeix a ser verda i per valors positius la mostra tendeix a ser vermella.*

- b, valor que està entre -100 i + 100. Per valors negatius la mostra tendeix a ser blava i per valors positius la mostra tendeix a ser groga.*

B.5. Conversió d'espai CIELab a CIELch

L'espai de color Lch, és el mateix espai que el CIELab, però en comptes de donar les coordenades cartesianes (a* i b*) es donen les coordenades polars (c* i h*). A on c* és el mòdul i h* és l'angle.

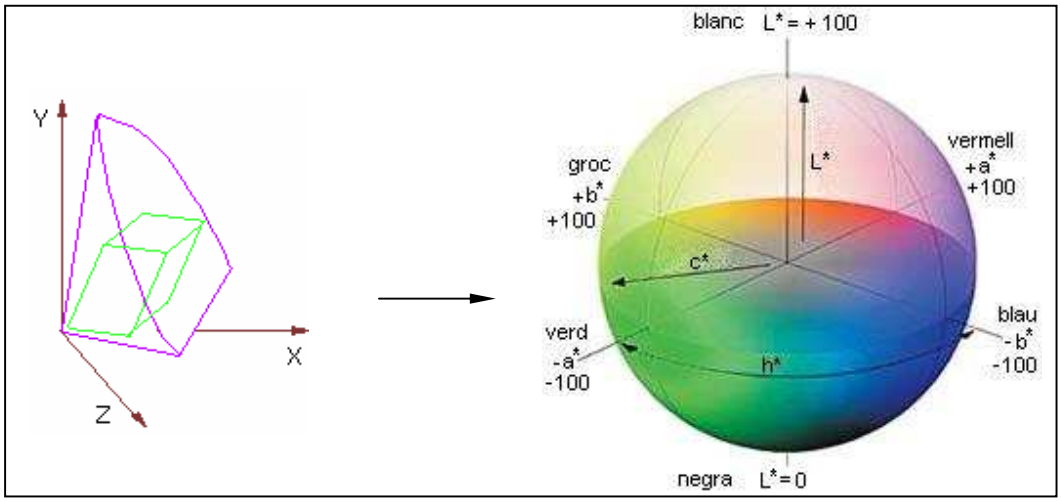


Figura 38 – Conversió d'espai XYZ a Lch

$L^* = L^*$

$c^*=c^*_{ab}=\sqrt{(a^*)^2+(b^*)^2}$ ***Equació 32***

$h^*=tan\text{-}1(b^*/a^*)$ ***Equació 33***

A on:

- L valor que està dins l'interval de 0 a 100. 0 Significa que la mostra és negra, no hi ha llum, i 100, significa que la mostra és blanca, arriba tota la llum de l'il·luminant*
- a, valor que està entre -100 i +100. Per valors negatius la mostra tendeix a ser verda i per valors positius la mostra tendeix a ser vermella.*
- b, valor que està entre -100 i + 100. Per valors negatius la mostra tendeix a ser blava i per valors positius la mostra tendeix a ser groga.*
- c mòdul de a* i b*.*
- h angle entre a* i b*.*

B.6. Càlcul de dE76

Càlcul de ΔE^*_{CIE76} = dE76:

$$dE76 = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$ ***Equació 34***

A on:

- ΔL^*= *L1*-L2* = dL, és la diferència de L* entre dues mostres.*
- Δa^*= *a1*-a2* = da, és la diferència de a* entre dues mostres.*
- Δb^*= *b1*-b2* = db, és la diferència de b* entre dues mostres.*

B.7. Càlcul CMC l:c

Càlcul de CMC l:c (1984) o dE^*_{CMC}:

$$dE^*_{CMC} = \left[\left(\Delta L^* / lS_L \right)^2 + \left(\Delta C_{ab}^* / cS_C \right)^2 + \left(\Delta H_{ab}^* / S_H \right)^2 \right] \qquad \textbf{Equació 35}$$

A on:

- $C^*=C^*_{ab}=\sqrt{(a^*)^2+(b^*)^2}$
- *H*=tan-1(b*/a*)*
- ΔL^**= L1*-L2* = dL, és la diferència de L* entre dues mostres.*
- $\Delta C^*=C^*_1-C^*_2$*, diferència de C* entre dues mostres.*
- $\Delta H^*=H^*_1-H^*_2$*, diferència de H* entre dues mostres.*
- $S_L=\begin{cases} 0.511 & L_1^* < 16 \\ \dfrac{0.040975 \cdot L_1^*}{1+0.01765 \cdot L_1^*} & L_1^* \geq 16 \end{cases}$
- $S_C=\dfrac{0.638 \cdot C_1^*}{1+0.0131 \cdot C_1^*}+0.638$
- $S_H=S_C \cdot (F \cdot T + 1 - F)$.
- $F=\sqrt{\dfrac{C_1^{*4}}{C_1^{*4}+1900}}$
- $T=\begin{cases} 0.56+\left|0.2\cos(h_1+168^o)\right| & 164 \leq h1 \leq 345^o \\ 0.36+\left|0.4\cos(h_1+35^o)\right| & altre \end{cases}$
- *l coeficient (reductor de* ΔL*) degut a la major sensibilitat que l'ull humà té en el croma C*, per defecte és 1. Té un valor superior a la unitat si es pretén veure una major sensibilitat degut al croma (llavors la fórmula és CMC 2:1).*
- *c coeficient degut a la major sensibilitat que té l'ull humà en el croma (C*) el seu valor per defecte és 1, aquest valor no sol ser superior a 1, el que es fa és incrementar el valor l. Si es decrementés estaríem alterant el dE total, cosa que ens estaríem inventant dades.*

B.8. Càlcul dE94

Càlcul de ΔE^*_{CIE94} o dE94:

$$dE94 = \left[\left(\Delta L_{12}^* / K_L \right)^2 + \left(\Delta C_{12}^* / (1 + K_1 C_1) \right)^2 + \left(\Delta H_{12}^* / (1 + K_2 C_1) \right)^2 \right] \quad \textbf{Equació 36}$$

A on:

- *$C^* = C^*_1 = \sqrt{(a_1^*)^2 + (b_1^*)^2}$, ídem per la mostra 2.*
- *$H^* = H_1^* = \tan^{-1}(b_1^*/a_1^*)$, ídem per la mostra 2.*
- *$\Delta L^* = L_1^* - L_2^* = dL$, és la diferència de L* entre dues mostres.*
- *$\Delta C^* = C^*_1 - C^*_2$, diferència de C* entre dues mostres.*
- *$\Delta H^* = H^*_1 - H^*_2$, diferència de H* entre dues mostres.*
- *K, coeficients que milloren les diferents sensibilitats que l'ull humà té amb la lluminositat, el croma i el matís. Observi la taula adjunta.*

	Arts gràfiques	**tèxtils**
K_L	1	2
K_1	0.045	0.048
K_2	0.015	0.014

Taula 5 – Coeficients K_L, K_1 i K_2

En aquest projecte s'han utilitzat els coeficients d'arts gràfiques.

B.9. Càlcul de dE2k

Càlcul de $\Delta E^*_{CIE2000}$ = dE2k:

$$dE2k=\sqrt{\left(\Delta L'/k_L S_L\right)^2+\left(\Delta C'/k_C S_C\right)^2+\left(\Delta H'/k_H S_H\right)^2+R_T\left(\Delta C'/k_C S_C\right)\left(\Delta H'/k_H S_H\right)^2}$$

Equació 37

A on:

- *L'=L**
- *a'=(1+G)a**
- $G=0.5\left[1-\sqrt{\overline{C}_{ab}^{*7}/\left(\overline{C}_{ab}^{*7}+25^7\right)}\right]$
- *b'=b**
- *C'=* $\sqrt{(a')^2+(b')^2}$
- *h'=tan-1(b'/a')*
- $C^*=C^*_{ab}=\sqrt{(a^*)^2+(b^*)^2}$
- $\Delta L'=L'_1-L'_2$ *diferència de L' entre dues mesures.*
- $\Delta C'=C'_1-C'_2$ *diferència de C' entre dues mesures.*
- $\Delta H'=2\sqrt{C'_1 C'_2}\sin(\Delta h'/2)$ *a on* $\Delta h'=h'_1-h'_2$.
- $S_L=1+\left(0.015\left(\overline{L}'-50\right)^2/\sqrt{20+\left(\overline{L}'-50\right)^2}\right)$
- $S_c=1+0.045\,\overline{C}'_{12}$
- $S_H=1+0.015\,\overline{C}'_{12}\,T$
- $T=1-0.17\cos\left(\overline{h}'-30^o\right)+0.24\cos\left(2\overline{h}'\right)+0.32\cos\left(3\overline{h}'-6^o\right)-0.2\cos\left(4\overline{h}'-63^o\right)$
- $R_T=-\sin(2\Delta\Phi)Rc$
- $\Delta\Phi=30\exp\left(-\sqrt{\left(\overline{h}'-275^o\right)/25^o}\right)$
- $Rc=2\sqrt{\overline{C}'^7_{12}/\left(\overline{C}'^7_{12}+25^7\right)}$
- $\overline{C}'_{12},\overline{L}'_{12},\overline{H}'_{12}$ *són el promig de dues mostres, amb els seus valors C_1 y C_2, L_1 y L_2 i per últim H_1 y H_2 respectivament.*
- k_L, k_c *i* k_h, *coeficients de compensació degut a la diferent sensibilitat que l'ull humà té sobre la lluminositat, el croma i el matís. En aquest projecte tots aquest coeficients estan a 1.*

FIGURA NUM. PÀGINA

FIGURA 1 – DESCRIPCIÓ FUNCIONAL D'UN COLORÍMETRE 3
FIGURA 2 – ESPECTRE DE L'IL·LUMINAT D50 4
FIGURA 3 – GRAUS RESPECTE LA VERTICAL (MESURA DE L'IL·LUMINAT) 4
FIGURA 4 – FILTRES TRES ESTÍMULS XYZ (CIE1931) 5
FIGURA 5 – DENSITÒMETRE PER TRANSMISSIÓ 6
FIGURA 6 – DENSITÒMETRE PER REFLEXIÓ 6
FIGURA 7 – INSTRUMENT DE MESURA PROPORCIONAT 6
FIGURA 8– ULL HUMÀ 10
FIGURA 9 – CONS I BASTONS 10
FIGURA 10 - TIPUS DE VISIÓ 11
FIGURA 11 – ESPAI CIE1931 O ESPAI XYZ 13
FIGURA 12 – ESPAI XYY 13
FIGURA 13 – ESPAI DE COLOR CIE L* A* B* O L* C* H* 14
FIGURA 14 – OBJECTIU PRIMARI 20
FIGURA 15 – DIFERENTS DISPOSITIUS DE MESURA DE COLOR 21
FIGURA 16 – COMPARATIVA DE MATERIALS PEL BLANC DE REFERÈNCIA 24
FIGURA 17 – DIAGRAMA DE BLOCS DE L'ENTRENADOR 28
FIGURA 18 – NÚMERO DE BITS DEL CONVERSOR 30
FIGURA 19 – DE76 DELS SISTEMES DE 1ER I 2ON ORDRE UTILITZATS 33
FIGURA 20 – L*(B), L*(V), L*(G) I L*(R) 34
FIGURA 21 – L*(FL) 35
FIGURA 22 – FUNCIÓ FA 36
FIGURA 23 – FUNCIÓ FB 37
FIGURA 24 – ESPECTRE DE L'IL·LUMINANT 42
FIGURA 25 – ESPECTRA DELS DOS IL·LUMINANTS 44
FIGURA 26 – ESPECTRE DELS 3 IL·LUMINANTS 45
FIGURA 27 – ESPECTRE DELS 4 IL·LUMINANTS 47
FIGURA 28 – DIFERÈNCIA DE COLOR (DES) DELS VALORS REALS VERSOS ELS VALORS GENERATS PELS DIFERENTS MODELS 49
FIGURA 29 – DIFERÈNCIA DE COLOR (DL, DA I DB) RESPECTE EL NOMBRE D'IL·LUMINANTS UTILITZATS 50
FIGURA 30 – MAJOR PÈRDUA DE INFORMACIÓ 51
FIGURA 31 - PERCENTATGE DE MOSTRES ACCEPTABLES 55
FIGURA 32 – ESTEREOADIANT 60
FIGURA 33 – SITUACIÓ DE TERMES 61
FIGURA 34 –A. IL·LUMINANT D50 B. TRES ESTÍMULS XYZ (CIE1931) C. XYZ D'UNA MOSTRA 62
FIGURA 35 – CONVERSIÓ D'ESPAIS XYZ A XYY 64
FIGURA 36 – CONVERSIÓ D'ESPAIS XYY A XYZ 65
FIGURA 37 – CONVERSIÓ D'ESPAI XYZ A LAB 66
FIGURA 38 – CONVERSIÓ D'ESPAI XYZ A LCH 68

TAULA NUM. PÀGINA

TAULA 1 – DIFERÈNCIES DE COLOR TROBATS MITJANÇANT EL MÈTODE MOORE-PENROSE (PRIMER ORDRE) 39
TAULA 2 – DIFERÈNCIES DE COLOR TROBATS (MATRIU M_MOORE$_2$) 41
TAULA 3 – RESULTATS (UN IL·LUMINANT) 43
TAULA 4 – RESULTATS (DOS IL·LUMINATS) 45
TAULA 5 – RESULTATS (TRES IL·LUMINANTS) 46
TAULA 6 – RESULTATS (QUATRE IL·LUMINANTS) 48
TAULA 7 – RESULTATS DEL MODEL DEFINITIU 54
TAULA 8 – VALIDACIÓ DE L'ALGORITME MITJANÇANT EL MÈTODE TROBAT 55
TAULA 9 – CARACTERÍSTIQUES DEL COLORÍMETRE DISSENYAT 56