# Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada



ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA UNIFORMIDAD DEL COLOR EN PANTALLAS DE TELEVISIÓN DE RETROPROYECCION

# TESIS MAESTRÍA EN CIENCIAS

### RAÚL BORJA URBY

Ensenada, Baja California, México, Noviembre de 2007 \_



#### TESIS DEFENDIDA POR

#### Raúl Borja Urby

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Heriberto Márquez Becerra Director del Comité

M. en C. José Daniel Barocio Montemayor *Miembro del Comité* 

Dr. Alfonso García Weidner

Miembro del Comité

Dr. David Salazar Miranda Miembro del Comité

Dr. Francisco Javier Esparza Hernández Miembro del Comité

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Encargado del Despacho de la Dirección de Estudios de Posgrado

Dr. Roger Sean Cudney Bueno

Coordinador del programa de posgrado en Óptica

23 de noviembre de 2007

#### CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA



#### PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS EN ÓPTICA

Estudio de la distribución espacial de la uniformidad del color en pantallas de televisión de retroproyección

#### TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios y obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

### Raúl Borja Urby

Ensenada, Baja California, México, 23 de noviembre del 2007

**RESUMEN** de la tesis de Raúl Borja Urby, presentada como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ÓPTICA con orientación en OPTOELECTRÓNICA. Ensenada, Baja California, noviembre de 2007.

Estudio de la distribución espacial de la uniformidad del color en pantallas de televisión de retroproyección

Resumen Aprobado por:

Dr. Heriberto Márquez Becerra.

Director de tesis

El presente trabajo de tesis comprende el estudio de la distribución espacial de la uniformidad del color en pantallas de televisión digital de retroproyección. Se presenta información sobre los fundamentos de diseño de una televisión, los cuales son: a) bases psicofísicas de la visión humana, que consideran los parámetros fisiológicos sobre la percepción de color, contraste y respuesta al brillo del sistema visual humano, b) colorimetría para televisión, donde los parámetros de crominancia, brillo y la diferencia de color apenas perceptible (JND) son relacionados con la calidad de la imagen, y c) el principio de operación del motor óptico de una televisión digital de retroproyección. Los parámetros utilizados en la evaluación de gamma y de uniformidad de color para las diferentes pantallas analizadas fueron: brillo (Lv), color (x, y) y diferencia de color apenas perceptible (JND). Con los resultados de los experimentos que se propusieron, se ha logrado estimar el factor de cambio inducido al color de la luz proyectada desde el bloque óptico, debido a la interacción de la luz con la pantalla. Así como también se logró descubrir la relación que existe entre la pantalla original de la televisión, y los ajustes de gamma y uniformidad de color que se realizan de la manera tradicional al bloque óptico. Gracias al conocimiento de la tecnología de los sistemas de una televisión de retroproyección, se puede generalizar que para las televisiones basadas en la tecnología aquí estudiada, se genera una dependencia entre la pantalla y el bloque óptico de una televisión al realizar los ajustes de gamma y uniformidad de color.

iii

**ABSTRACT** of the thesis presented by Raúl Borja Urby, as a partial requirement to obtain the SCIENCE MASTER degree in OPTICS with orientation in OPTOELECTRONIC. Ensenada, Baja California, November 2007.

Study of the spatial color uniformity distribution of the screen of a rear projection television

Abstract Approved by

Dr. Heriberto Márquez Becerra.

Thesis Director

This thesis work comprises a study of the spatial color uniformity distribution of the screen of a digital rear projection television. Fundamentals concerning the design of digital television are presented, which are: a) psychophysics of human vision, it considers the physiologic parameters of color perception, contrast and brightness sensitivity of the human visual system, b) colorimetry for television, were the parameters of chrominance and just noticeable difference are related to image quality, and c) the operational principles of the optical engine of a digital rear projection television. The parameters used to evaluate gamma and color uniformity of the screens, were: color (x, y), brightness (Lv) and just noticeable difference (JND). By the results obtained from the planned experiments, it was possible to estimate the change factor induced to the color of the light projected from the optical block, due to the interaction of the light and the screen. As well as finding the relation between the original screen of the television, and the gamma and color uniformity adjustments made to the optical block by means of the traditional manner. Owed to the achieved knowledge of the rear projection television systems and technology, it is possible to say, that in general for all the televisions systems based on the technology here studied, there is dependence between the screen and the optical block of a television when the adjustments of gamma and color uniformity are made.

### A mi familia:

Papá, Mamá y hermanos, Rafael, Gloria Elsa, Rafa, Carlos y Cesar. Las personas más importantes en mí existir.

# Agradecimientos

A Dios Padre por una vida de bendiciones, por mi familia y amigos, gracias. Por iluminarme y guiarme; y por todas las personas que pusiste en mi camino para permitirme llevar a buen término este proyecto. Por estar siempre conmigo, cuidarme y protegerme en cada momento de mi vida. Te doy gracias por la calma y la prosperidad de mis seres amados durante este periodo, sin las cuales no hubiera podido realizar mi tesis. Por ayudarme a crecer, a ser mejor y a cumplir mis objetivos, gracias.

A mi *Papá* por dar lo mejor de ti, por tu esfuerzo para que mi vida sea mejor gracias. Por motivarme a hacer las cosas bien, y por enseñarme a terminar lo que empiezo. A mi *Mamá* por todo, gracias. Por las largas conversaciones telefónicas, por tu apoyo y confianza, por todas tus oraciones, gracias. Por tu guía y sabios consejos. A mis *hermanos: Rafa Carlos y Cesar* por compartir sus vidas conmigo, gracias. Por todas las porras, el apoyo, los consejos; por compartir sus experiencias gracias. Por todas sus burlas, por toda la carrilla, por apurarme a terminar mi tesis y por no creerme lo difícil de sacar la maestría, gracias. A mis *Padres* y a mis *hermanos* por darme las alas, por enseñarme a usarlas y por dejarme volar, por todo su amor Gracias. A mi *tía Betty*, y a mis primos: *Ana, Valeria, Miguel y Gaby*, por toda su alegría, por todas las canciones cantadas y por todas las conversaciones que hemos compartido toda la vida, gracias. Por toda su confianza, interés y buenos deseos.

A todos los anteriores por ser parte fundamental en mi vida, los amo y los extrañe demasiado.

A mis tíos: *Arturo, Mine, Raúl y Lita*, por apoyarme en el comienzo de este proyecto, por el apoyo y los primeros consejos que ayudaron a formar la base sólida en la que me apoye para realizarlo.

A mis amigos:

- En la laguna, por no saber cuanto los iba a echar de menos, por su amistad fiel gracias.
- En Ensenada, por ser tan curadas, gracias. Porque cuando inicie este proyecto jamás cruzó por mi mente que haría buenos amigos en el trayecto. Les agradezco por toda su ayuda y preocupación por un servidor. Gracias por hacer mi vida en Ensenada, y en el CICESE, más agradable, más fácil y más divertida. Gracias por los buenos recuerdos, por ser mis compañeros y portar conmigo las secuelas del trauma que nos hace merecedores del prefijo M. en C. en nuestros nombres.
- En SONY- Tijuana, por su amistad y apoyo. Por la cura y los buenos ratos, platicas de sobremesa, desayunos y comidas inolvidables, Gracias.

Especialmente al *Dr. Heriberto Márquez Becerra* que ha marcado una diferencia positiva en mi formación académica. Gracias por toda la confianza y por todo el apoyo, por permitirme ser parte de uno de tus grandes proyectos. Por estar presente y pendiente durante el desarrollo de esta tesis. Por tu pensamiento claro y crítico que permitió sacar a delante con buena dirección esta investigación. Gracias por la camaradería, por la guía, por la presión y por el consejo, todos siempre en el momento oportuno.

Al M. en C. Daniel Barocio Montemayor gracias por tu metodología crítica y perfeccionista.

Al departamento de Core Technology de SONY de Tijuana Este, por su compromiso con el desarrollo, innovación e incansable empeño para cambiar la industria maquiladora en México: Horman Millán, Roció Pria, Daniel Barocio, Said Castillo, Víctor Martínez, Judith Amaral, Esteban Álvarez, Rodrigo Cuenca, Karitina Sosa, Maria de Jesús López, Gregorio Chávez, Rogelio Ruiz, Jaime García, Rafael Olivera, Joaquín Díaz, Andrés Sandoval, Oscar Martínez. Gracias por todas las enseñanzas, los consejos, por su amistad, y por la gran oportunidad de realizar dentro de las instalaciones de SONY de Tijuana el trabajo de investigación de esta tesis.

Andrés Sandoval y a Oscar Martínez gracias por todo el tiempo y por toda la experiencia compartida, para la comprensión y el desarrollo de los ajustes de gamma y uniformidad de color.

A los miembros del comité de tesis: Dr. Alfonso García Weidner, Dr. David Salazar Miranda, Dr. Francisco Javier Esparza Hernández y M. en C. Daniel Barocio Montemayor, por todas las sugerencias, críticas y recomendaciones dadas durante el desarrollo del proyecto de tesis.

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, a los Profesores del Departamento de Óptica, y personal del Centro, por su compromiso con la educación. A todos los que contribuyeron a mi formación en la apasionante rama de la óptica.

A los Directivos de CICESE y SONY por el "Convenio General de Colaboración Científica y Tecnológica CICESE – SONY", que permitió llevar a cabo este trabajo de investigación.

Agradezco al CONACYT por permitirme realizar mis estudios de educación superior al otorgarme la beca económica No. 200032 por el periodo establecido, la cual siempre llegó a tiempo.

Raúl Borja Urby

# Tabla de contenido

Ca	pítulo / Sección	Página
Resume Abstract Agraded Tabla de Lista de Lista de I Intro	en et cimientos e contenido e figuras e tablas educción	iii iv vi viii x xiv 1
I.1 I.2	Objetivo Estructura de la tesis	
II Integ	gración de una RPTV	6
II.1	Bloques componentes de una RPTV	8
III Bases	s Psicofísicas de la visión humana	13
III.1 III.2 III.3 III.4 III.5 I	Percepción. Ley de Weber. El ojo humano. III.3.1 El ojo humano y la teoría del color. III.3.2 Sensibilidad y tipos de visión	
IV Color	rimetría para televisión	28
IV.1 IV.2 IV.3 IV.4 IV.5 IV.6 IV.7 IV.8 IV.9	Leyes de la Colorimetría. Representación del color. El modelo de color RGB. Modelo de color XYZ. Diagrama cromático CIE <i>xy</i> Lv Elipses de MacAdam. Espacio de color CIE <i>u'v'</i> Lv Diferencia de color apenas perceptible. RGB para televisión.	30 34 35 37 39 42 44 44 46 46
V Óptic	ca de una TVRP	49
V.1 V.2	Introducción Bloque óptico: principio de operación	

Tabla de contenido (continuación)

4

### Página

V.3 Sistema o	de iluminación del bloque óptico	53	
V.3.1 L	ámpara	53	
V.3.2 F	iltro para el control del UV	54	
V.3.3 F	iltros para el control del IR	56	
V.3.4 L	ente Integradora	58	
V.3.5 St	istema de conversión de polarización	61	
V.4 Generaci	ón de imágenes a color	63	
V.4.1 Fi	iltros dicroicos	64	
V.4.2 M	licrodisplay de cristal líquido	65	
V.4.3 G	eneración de la imagen a ser proyectada	65	
V.4.4 L	entes de proyección	67	
V.5 Pantalla c	de una televisión de retroproyección	69	
V.5.1 G	anancia de la pantalla y ángulo medio	70	
V.5.2 C	Componentes de la pantalla	73	
V.5.3 D	Discriminación de la luz ambiental	76	
V.5.4 EI	nsamble de la pantalla de retroproyección	77	
VI Métodos y mater	riales	79	
VI.1 Influencia	a de las pantallas sobre el ajuste de Gamma	80	
VI.2 Influencia	a de las pantallas sobre el ajuste de Uniformidad de Color	82	
VI.3 Análisis e	espectral de la pantalla	84	
VI.4 Distribuc	ción espacial de la Uniformidad del color en una pantalla de		
retroproyección	n	85	
VII Resultados y	Discusión	89	
VII 1 Aiuste de	gamma	89	
VII.2 Resultado	os del análisis de la influencia de las pantallas sobre el ajuste de	07	
gamma	1 5	93	
VII.3 Ajuste de	Uniformidad de color1	03	
VII.4 Resultado	os del análisis de la influencia de las pantallas sobre el ajuste de		
uniformidad de	e color 1	05	
VII.4.1 M	lanipulación numérica de los valores triestímulos 1	09	
VII.5 Resultado	os del análisis espectral1	13	
VII.6 Resultado	os del análisis de la distribución espacial de la uniformidad del color		
de una pantalla	11	14	
VII.6.1 A	nálisis de color del bloque óptico1	15	
VII.6.2 A	nálisis de color de la lente de Fresnel y de la placa lenticular 1	16	
VII.6.3 At	nálisis de color de la pantalla1	19	
VII.6.4 At	nálisis de los resultados evaluando las leyes de Grassmann 1	20	
VIII Conclus	siones 1	23	
Apéndice A 129			
Sistema formador de imágenes 129			

# Lista de figuras

# Figura

1	Televisión digital de retroproyección SONY Grand Wega
2	Arreglo tradicional para realizar los ajustes de gamma y uniformidad de
	color en una televisión de retroproyección. En la imagen se muestran
	algunos de los sistemas que integran este tipo de televisiones así como
	también el sistema de ajuste7
3	Secuencia de producción de una televisión de retroproyección: 1)
	integración de los diferentes bloques componentes que forman la televisión,
	2) sección de ajustes de calidad de imagen, 3) pruebas de control de calidad
	de toda la televisión, 4) documentación, empaque y salida de la televisión 11
4	Ley de Weber
5	El ojo humano17
6	Distribución de Conos y Bastones en la retina
7	a) Curvas de sensibilidad de los Conos b) Curvas de sensibilidad fotópica y
	escotópica del Observador Promedio19
8	Espectro de luz visible
9	Representación gráfica de los parámetros del color mediante el espacio CIE
	HSV. Donde H corresponde al Tono (Hue), S a la Saturación (Saturation) y
	V al Brillo (Value)
10	Tono y Saturación. a) Tono definido por la longitud de onda dominante, rojo
	saturado, b) rosa, rojo superpuesto en un fondo blanco, rojo no saturado 22
11	Niveles de intensidad percibidos por el ojo humano
12	Respuesta logarítmica del ojo a la intensidad luminosa
13	a) Franjas de escala de gris con igual cambio de intensidad, b) intensidad
101.101	real de la escala de gris
14	a) franjas de escala de gris que iguala la respuesta logarítmica del ojo, b)
	intensidad real de la escala de gris logarítmica
15	Patrón de frecuencia y contraste. Incremento de la frecuencia de izquierda a
1.5	derecha y decremento del contraste de arriba abajo
16	Colores de luz primarios superpuestos
17	Esquema conceptual del experimento de igualamiento de color
18	Curvas de igualamiento de color del modelo de color RGB
19	Curvas de igualamiento de color del modelo de color CIE XYZ
20	a) Gamut tridimensional del modelo de color CIE XYZ, b) proyección del
0.1	diagrama cromático tridimensional a un plano
21	a) Diagrama cromatico CIExyLv, b) linea espectral, la linea del cuerpo negro
22	y linea purpura en el diagrama cromático
22	Elipses de MacAdam en el espacio de color: a) CIExyLv, b) CIEu'v'Lv

## Lista de figuras (continuación)

23	a) Diagrama cromático CIEu'v'Lv, b) línea espectral, la línea del cuerpo
	negro y línea púrpura en el diagrama cromático45
24	Diferentes gamuts de tecnologías de televisión: a) tecnología de 5 colores
	primarios para una televisión de proyección, b) comparativo entre gamut de
	televisión de cristal líquido y proyección
25	Diagrama esquemático de una televisión de retroproyección (RPTV)
26	Bloque óptico de una RPTV de microdisplay: a) ilustración, b) diagrama
	esquemático,
27	Distribución de potencia espectral típica de una lámpara de mercurio UHP
	de 100 w y 120 w
28	Curvas de transmitancia de diferentes filtros de absorción
29	Sistema de filtrado del UV de la luz visible emitida por la lámpara de
	mercurio UHP
30	Transmitancia de los espejos dieléctricos: a) Frío, b) Caliente
31	Potencia espectral característico de una lámpara de mercurio UHP
32	Sistema de iluminación crítica a) reflector elíptico y lente negativa, b) perfil
	de distribución de intensidad de la luz visible incidente en el modulador
	(microdisplay)
33	Sistema de lentes integradoras (fly's eye lens)
34	Efecto de iluminación uniforme debido al sistema de lentes integradoras61
35	Sistema convertidor de polarización
36	Curvas de reflectancia espectral de los filtros dicroicos: a) azul, b) verde y c)
	rojo utilizados en el bloque óptico64
37	Imagen compuesta por la mezcla aditiva de los primarios RGB mediante el
	cubo dicroico X. <sup>*</sup>
38	Diagrama de un telefoto invertido típico
39	Pantallas de proyección: a) frontal y b) retroproyección
40	Ganancia de la pantalla. La línea segmentada () representa una ganancia
	de 1.0 de una superficie Lambertiana, la línea punteada () representa
	idealmente a una ganancia de 1.5 y la línea sólida (-) es una representación
	real de una ganancia de 1.5
41	Fresnel: a) Sección transversal, b) Vista frontal, y lenticular: c) Secciona
	transversal, d) Vista frontal74
42	Uniformidad de la luminancia de una pantalla de retroproyección
43	Pantalla de retroproyección, arreglo óptico de una lente Fresnel y una placa
	lenticular
44	Placa lenticular
45	Experimento 1: ajuste de gamma, a) diagrama de flujo del procedimiento
	para la medición de los parámetros de color y brillo, b) medición del cambio
	en el ajuste de gamma al centro de la pantalla
46	Experimento 2: ajuste de uniformidad de color

### Lista de figuras (continuación)

47	Análisis de transmitancia espectral de la pantalla de una televisión de retroprovección. Cada región identificada por la mascarilla es una región de
	muestreo: a) medición de la fuente de referencia de cada región b) medición
	de transmitancia espectral a lo largo de la pantalla
48	a) Fresnel y lenticular cortados en 28 secciones de 6"x6", b) Arreglo óptico
	v metodología del experimento 4
49	Mascarilla de medición 88
50	Equipo de ajuste: Computadora, colorímetro Minolta CA210 y televisión 89
51	a) Señal de video digital b) respuesta natural de los 3 moduladores 91
52	Especificaciones para ajuste de color y brillo
53	a) Tablas LUT, valores de compensación de los tres moduladores, b) Curvas
00	de brillo de los tres moduladores ajustadas para una $y = 2.4$ 92
54	Crominancia de la televisión original. 33 niveles de brillo del color blanco
	del generador interno de la televisión (abscisas) contra coordenadas de color
	(x, y) del diagrama cromático CIE xyLy (ordenadas) 93
55	Curva de brillo ajustada de la televisión original. En la figura se muestran
	las dos curvas de brillo, la ajustada y la de diseño (Ly tg),
56	a) Coordenada cromática de diseño ( $x=0.266$ , $y=0.277$ ) y elipse de
	MacAdam de 1 JND, b) Coordenadas cromáticas de los niveles de brillo
	TST 4 – TST 32 de la televisión original y 5 elipses de MacAdam
	correspondientes de 1 JND a 5 JND sobre el diagrama CIE xvLv
57	a) Cromaticidad de las 9 zonas de influencia medidas en la pantalla original.
	y diferencia de color en JND de las zonas (P1 – P9) comparadas contra ( $x =$
	0.266, $y = 0.277$ ), b) coordenadas cromáticas de las 9 zonas de influencia
	sobre el diagrama de color CIE xyLv
58	Resultados de la manipulación numérica al valor triestímulo X del nivel TST
	15: a) valores cromáticos y diferencia de color, b) gráfica de la diferencia de
	color entre las variaciones
59	Resultados de la manipulación numérica a los valores triestimulo: a) Y15
	fuente verde, b) Z <sub>15</sub> fuente azul, y c) gráfica de la diferencia de color entre
	las variaciones del triestimulo Z <sub>15</sub> 111
60	Desempeño cromático del bloque óptico: a) coordenadas cromáticas (u',v')
	en función del tiempo, b) diferencia apenas perceptible [JND] de las
	variaciones cromáticas del bloque óptico en función del tiempo 115
61	Distribución espacial de la uniformidad de color de las 28 secciones en JND
	para: a) la lente de Fresnel y b) la placa lenticular116
62	Resultados estadísticos del cambio de color inducido por: a) lente Fresnel
	$\mu_f=0.48$ , $\sigma_f=0.14$ , b) placa lenticular $\mu_l=0.85$ , $\sigma_l=0.13$ y c) pantalla $\mu_s=1.44$ ,
	σ <sub>s</sub> =0.19117
63	Histograma de los diferentes eventos de cambio del color en unidades de
	JND, ocurridos en las secciones evaluadas de los componentes de la
	pantalla: a) lente de Fresnel, b) placa lenticular y c) la pantalla118

### Lista de figuras (continuación)

64	Distribución espacial de la uniformidad del color en unidades de JND de las
	28 secciones a lo largo de: a) la pantalla de retroproyección, b) evaluación numérica de la tercera lev de Grassmann
65	a) Corrimiento del color de la luz del bloque óptico ( $x_{ave} = 0.2438$ , $y_{ave} =$
	0.2702) debido a la lente de Fresnel, representado por los puntos naranja, b)
	el color de la luz luego de ser transmitido por la lente de Fresnel, cambia a
	una coordenada cromática dentro de la elipse gris (0.48 JND) 121
66	Cambio de color promedio inducido por la placa lenticular (elipse gris
	oscuro), y un ejemplo de un posible corrimiento del color de la luz del
(7)	bloque óptico luego de ser transmitida por la pantalla
6/	Curva H&D. Se reconocen tres regiones de esta curva, el "dedo del pie" de
60	A a B; la "linea recta" de B a C; y el "hombro" de C a D
60	Diagrama esquematico de un CRT monocromatico
70	Dispositivo formador de imágenes basado en la tecnología de Cristal
10	líquido: a) matriz activa de un microdisplay h) estructura de un elemento de
	imagen (Píxel) 134
71	Dos tipos del cristal líquido: a) fase nemática, b) distribución de moléculas
	de fase colestérica en diferentes planos perpendiculares al eje helicoidal 135
72	Principio de operación del 90° TN LCD, a) transmisión de la luz a través del
	píxel normalmente blanco, b) vista frontal de la molécula torcida de cristal
	líquido donde $\Phi$ es el ángulo de torsión (twist), L representa el estado de
	polarización lineal de la luz y n es el vector director de cada molécula
73	Ángulo de inclinación $\theta$ , vista lateral de una cadena de moléculas de cristal
	líquido entre las dos placas de vidrio, los vectores directores de las
-	moléculas a los extremos se mantienen perpendiculares
74	Funcionamiento básico del TN-LCD, a) rotación de 90° de la luz al ser
	transmitida a traves del pixel, b) extinción de la luz del pixel al aplicar un
75	voltaje mucho mayor al voltaje umbral ( $V_U$ )
75	v anacion de los angulos de inclinacion y torsion del vector difector (n) 139
10	curva de transmitancia h) curva de contraste
	cui va de transfinitationa, D) cui va de contraste

# Lista de tablas

## Tabla

I.	Comparación entre las coordenadas cromáticas de los 33 niveles de brillo al centro de la pantalla original, y las coordenadas cromáticas al centro de las
ΤT	Distribución de las coordenadas cromáticas de los niveles de brillo (TST 4 -
11.	TST 32) y elipses de MacAdam sobre el diagrama cromático CIE $xyLv$ , de cada
	una de las pantallas utilizadas en el experimento 1100
III.	Diferencia de color en JND de los 33 niveles de brillo entre la pantalla original y
	las pantallas utilizadas en el experimento 1
IV.	Resultados estadísticos de los niveles de brillo TST 4 – TST 9 de las pantallas
	analizadas en el experimento 1
V.	Diferencia de color de las 9 zonas de influencia de las 8 pantallas, por columnas
	se presenta en JND el corrimiento del color de cada zona de influencia (P1 – P9)
•	comparada contra la coordenada de diseño107
VI.	Resultados del experimento 2. En cada gráfica se presentan las coordenadas
	cromáticas de cada zona de influencia de las 8 pantallas evaluadas sobre el
	diagrama cromático CIE xyLv
VII.	Valores de $\theta$ y $\Phi$ a lo largo de la molécula de cristal líquido

# I Introducción

Es inimaginable concebir el siglo XXI sin la existencia de los sistemas electrónicos de visualización o despliegue de información, conocidos como: monitores y/o televisiones. Estos sistemas reciben en sus puertos de entrada diferentes señales de voltaje que representan: video, sincronización, gráficos o información de texto, para procesarlas en tiempo real y desplegar en pantalla las imágenes de movimiento continuo o información gráfica (Robinson et al, 2005). Actualmente existe una amplia variedad de sistemas de visualización, siendo los más conocidos, el sistema de visión directa, y el sistema de proyección. El sistema de visión directa incluye a las tecnologías: tubo de rayos catódicos (CRT), sistemas de plasma, diodo emisor de luz orgánico (OLED) y dispositivos de cristal líquido (LCD). Esta última tecnología compite fuertemente por el mercado de televisiones y monitores de computadora cubierto en su totalidad por el CRT hasta hace un par de años. En el año 2003, la producción de monitores para computadora basados en matriz activa de cristal líquido (AMLCD) superó la producción de monitores de CRT destinados al mismo mercado. Los sistemas de visión directa basadas en las nuevas tecnologías despliegan en la pantalla información (imagen) con alta resolución y altos niveles de brillo. Sin embargo es difícil y caro fabricar sistemas de visión directa con dimensiones de pantalla lo suficientemente grandes. Por otro lado, los sistemas de proyección utilizan sistemas ópticos para amplificar imágenes pequeñas creadas ya sea por tecnología de CRT, o por tecnología de moduladores de luz. Las televisiones de proyección pueden operar en dos configuraciones, proyección frontal y proyección posterior o retroproyección. Actualmente,

los sistemas de proyección son la opción económica para la producción de sistemas de despliegue de información de alta resolución, y dimensiones de pantalla adecuados (~70" en diagonal) para la reproducción de imágenes de alta definición. Estos sistemas se basan en tecnologías de moduladores de luz. Son tres las principales tecnologías que se han desarrollado para sistemas de proyección: dispositivos digitales de microespejos (DMD), silicio policristalino de alta temperatura (HTPS) y cristales líquidos sobre silicio (LCOS). Esta tesis se centra en el estudio del sistema de retroproyección de la televisión Grand Wega de la marca SONY basada en la tecnología (HTPS), que se presenta en la Figura 1. La televisión de retroproyección (RPTV, por sus siglas en inglés) es manufacturada en las instalaciones de SONY de Tijuana Este S.A de C.V. localizada en Tijuana, Baja California, México. Esta planta se encarga de cubrir la demanda de este tipo de televisiones en Canadá, Estados Unidos y México. En los departamentos de diseño Core - Technology y Manufacture Systems Development (MSD) de esta empresa, existe la incertidumbre respecto a la dependencia entre la pantalla de una televisión de retroproyección y su bloque óptico. Por lo que se tiene la necesidad de realizar un estudio y proponer un método para obtener la variación espacial cromática de la luz transmitida por una pantalla, y su influencia sobre los ajustes de gamma y uniformidad de color de una RPTV, cuando se cambia la pantalla de la televisión.



Figura 1. Televisión digital de retroproyección SONY Grand Wega.

## I.1 Objetivo

El objetivo de esta tesis, es realizar un estudio de la distribución espacial de la uniformidad del color de la luz transmitida por la pantalla de una televisión de retroproyección. En la presente, se propone una metodología para determinar la contribución de cada una de las componentes de la pantalla: lente de Fresnel y placa lenticular/difusor, sobre las variaciones de color de la pantalla completa.

### I.2 Estructura de la tesis

En el capítulo I se introduce al tema, ubicando el trabajo de esta tesis en la rama de la ciencia y en el área tecnológica. Se establece el objetivo de la misma. Y por último se describe brevemente el contenido de los capítulos presentados en la tabla de contenido.

En el capítulo II se amplía la información presentada al final de la introducción, y se explica la causa que llevó a realizar el presente trabajo de investigación. Se menciona lo

que es una televisión integrada y se da una breve descripción de sus componentes. Se ilustra el esquema del sistema de ajustes para realizar las correcciones de gamma y uniformidad de color. Y se describe el proceso de integración de una televisión digital de retroproyección.

En los capítulos III, IV y V, se profundiza en los fundamentos teóricos necesarios para comprender los parámetros psicofísicos, de colorimetría y ópticos, elementales para el buen diseño y el eficiente desempeño de una televisión digital.

En el capítulo VI se describe la metodología propuesta para llevar a cabo el análisis de la variación de los ajustes de gamma y de uniformidad de color realizados al bloque óptico, para cada una de las pantallas estudiadas. Se explica también la manera en que se estimó la equivalencia de 1 JND y 2 JND, en valores porcentuales del cambio de intensidad radiada por los canales de luz rojo, verde y azul. Se describen el método y el arreglo óptico diseñados durante la presente tesis, para estudiar la variación espacial cromática de la luz transmitida por la pantalla, y por sus componentes: lente de Fresnel y placa lenticular/difusor, independientemente.

En el capítulo VII se presentan los resultados obtenidos mediante los métodos propuestos en el capítulo VI. Los resultados permitieron determinar la dependencia entre las pantallas y el bloque óptico de una televisión de retroproyección, midiendo la magnitud del cambio producido a los ajuste de gamma y uniformidad de color realizados al bloque óptico. Se muestra la variación en la intensidad radiada de manera independiente por los canales rojo, verde y azul, para obtener un cambio de 1 JND y 2 JND. Se presentan los resultados de la distribución espacial de la uniformidad del color de una pantalla, estudio principal de esta tesis. Se muestran los parámetros de color, brillo y diferencia de color

apenas perceptible, a lo largo de la pantalla y de sus componentes: la lente de Fresnel y la placa lenticular, obteniendo el factor de cambio de color inducido a la luz proyectada desde el bloque óptico, al interactuar con cada componente. Por último se presenta una comparación entre los mencionados factores de cambio experimentales, y una evaluación usando la segunda ley de Grassmann.

En el capítulo VIII han sido escritas las conclusiones del presente trabajo de tesis. En las últimas hojas se encuentra la literatura citada, base teórica seguida en esta tesis. Y posteriormente el apéndice A en el que se describe el origen de gamma en la tecnología fotográfica, y su aplicación en las tecnologías de televisión CRT y LCD. Incluye también el principio de funcionamiento de un modulador de luz o válvula óptica de cristal líquido.

# II Integración de una RPTV

El proceso típico de producción de una televisión digital de retroprovección basada en la tecnología de micro-moduladores (microdisplays) de LCD se inicia al integrar los diferentes componentes del sistema, los cuales se pueden agrupar en los siguientes bloques: chasis, cubierta (housing), sistema eléctrico, sistema electrónico digital, bloque óptico, espejo y pantalla de retroproyección. Es muy difícil iluminar uniformemente la pantalla de una RPTV, además, debido a las variaciones en el volumen de cristal líquido de cada uno de los microdisplays, se presenta la no uniformidad de crominancia en las señales roja, verde y azul, lo que significa diferentes colores en diferentes lugares de la pantalla. Es por estas razones que una vez integrada la televisión se realizan los ajustes de gamma y uniformidad de color a cada televisión para acoplar los componentes óptico/electrónico y corregir dichos problemas. Posteriormente la televisión pasa a ser evaluada por el departamento de control de calidad. En la Figura 2 se muestran los bloques principales que conforman una RPTV, así como también el sistema tradicional de ajuste de gamma y uniformidad de color. Estos sistemas de ajuste poseen un sistema de medición de despliegue (MDS, por sus siglas en inglés) o un sistema de imagen de CCD, equipados con circuitos digitales procesadores de imagen que hacen el ajuste de gamma por medio de tablas LUT (look up tables). El algoritmo de corrección de gamma mejora la luminancia y la uniformidad del color en toda la pantalla de la televisión.



Figura 2. Arreglo tradicional para realizar los ajustes de gamma y uniformidad de color en una televisión de retroproyección. En la imagen se muestran algunos de los sistemas que integran este tipo de televisiones así como también el sistema de ajuste.

En un esfuerzo continuo de la empresa por mejorar la producción de televisiones, está contemplando la viabilidad de cambiar la manera tradicional de realizar los ajustes. Una de las propuestas es la de hacer los ajustes de gamma y uniformidad de color antes de realizar la integración de la televisión. Esto infiere que los ajustes realizados en el bloque óptico no se vean afectados por la posterior incorporación del espejo y la pantalla durante la integración. Sin embargo, no existe información referente a la influencia del espejo y la pantalla en las propiedades de gamma y uniformidad de color de una televisión con el bloque óptico preajustado.

A continuación se hace una breve descripción de los principales bloques componentes de una RPTV.

## II.1 Bloques componentes de una RPTV

- <u>Chasis</u>. Se entiende por chasis al conjunto de placas (tarjetas electrónicas), que mantienen operando a la televisión. El chasis integra las placas del circuito de alto voltaje para el audio, las placas de los circuitos de ajuste de gamma y uniformidad de color, la placa de los circuitos de la botonera (encendido, canal, volumen, video) y receptor del control remoto, entre otras.
- <u>Cubierta</u>. Se conforma de las cubiertas plásticas que definen la forma final de la televisión. Como son: la cubierta trasera, el marco de la pantalla, la botonera, y la base o soporte. A parte de ser diseñado ergonómicamente para atraer la atención de los potenciales clientes, la cubierta cumple con la función de aislar los componentes internos de la televisión, de agentes externos como: temperatura, polvo, humedad, niños, etc. A la cubierta se le da un tratamiento cosmético principalmente en las zonas de contacto ya sea visual o mecánico entre la televisión y el espectador.
- <u>Sistema eléctrico</u>. Este sistema controla el abastecimiento de energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de una televisión. La protege de las subidas de voltaje de las líneas de abastecimiento, y evita que el ruido eléctrico generado por la televisión regrese a las mismas.
- <u>Sistema electrónico digital</u>. En este "bloque" se agrupan las tarjetas electrónicas necesarias para el control, la sincronización y el procesamiento de las señales electrónicas necesarias para la interpretación del video, el barrido entrelazado o progresivo de la imagen generada en los microdisplays, entre otras. También incluye el control de los puertos de comunicación de la televisión, utilizados para

conectar la televisión a elementos externos como los equipos de ajustes, calibración y diagnóstico.

- <u>Bloque óptico</u>. Es el generador de la imagen que el espectador ve en la pantalla. El principio de operación del bloque óptico consiste de:
  - a) Sistema de iluminación de tres canales, rojo, verde y azul. Estos canales de colores primarios son formados por eliminación de UV e IR, homogeneización, y separación física de los colores a partir de una fuente de mercurio de alta presión.
  - b) Formación de imagen a color. La imagen a color está compuesta por tres imágenes de color primario formadas cada una en un microdisplay de LCD, las cuales son integradas por un cubo dicroico y amplificadas por la lente de proyección sobre la pantalla.
- <u>Espejo</u>. Utilizado para desviar angularmente la imagen proyectada por el bloque óptico y reflejarla hacia la pantalla. Lo anterior permite al diseñador de la televisión reducir la profundidad de la cubierta y lograr por lo tanto una televisión más delgada.
- <u>Pantalla de retroproyección</u>. Formada por una lente de Fresnel, una placa de microlentes cilíndricas tipo plano-convexas y un difusor. Las principales funciones de este tipo de pantallas son: primero, colimar la luz divergente proyectada desde el bloque óptico mejorando la luminancia de la pantalla, segundo, redirigir la luz horizontalmente hacia los espectadores. Estas dos primeras características proveen a

9

la pantalla de una ganancia, haciendo que la imagen que en ella se enfoca sea más brillante. La tercera función es la proyección de la imagen con brillo uniforme y es debido al difusor que incluye en la pantalla. El contraste de la imagen desplegada en pantalla, se mejora por medio de tiras negras (black stripes) que absorben la luz ambiental que incide en la pantalla, evitando que dicha luz altere el color y el brillo de la imagen.

La concepción de una RPTV, desde la integración de sus partes hasta su salida de la fábrica lista para su venta, se presenta de manera muy general en la Figura 3. Al inicio de la línea de producción se integran los bloques previamente mencionados y se ensambla una televisión (sección 1). En este punto, la integración de la televisión ha sido completada y por lo tanto la televisión se encuentra totalmente armada como se mostró en la Figura 1.



Figura 3. Secuencia de producción de una televisión de retroproyección: 1) integración de los diferentes bloques componentes que forman la televisión, 2) sección de ajustes de calidad de imagen, 3) pruebas de control de calidad de toda la televisión, 4) documentación, empaque y salida de la televisión.

Una vez que el sistema ha sido integrado, es necesario realizar diversos ajustes a los microdisplays contenidos en el bloque óptico, para corregir los problemas de iluminación y de uniformidad, mediante una comunicación periférica entre la televisión, y una computadora de ajuste dentro de un cuarto oscuro. Dichos ajustes se hacen en la sección 2), entre ellos se encuentran los ajustes de: corrección de gamma, uniformidad de color (UF) contraste (CR) y balance de blanco (WB). En la sección 3), se realiza una inspección de calidad en la que se evalúa la televisión, su apariencia y operatividad. La televisión puede ser rechazada por tener algún defecto, o no encontrarse dentro de las especificaciones o normas de calidad. Al final en la sección 4) se empaca la televisión junto con sus documentos y manual de operación, así como también su control remoto.

Es éste a grandes rasgos, el proceso de producción de una televisión de retroproyección. Necesario conocerlo para saber cuales serán los componentes y sistemas involucrados durante el desarrollo de esta investigación.

Como estrategia para comprender los fundamentos de diseño de una televisión digital de retroproyección fue necesario profundizar en: a) las bases psicofísicas de la visión, las cuales consideran parámetros fisiológicos sobre la percepción de color, contraste y respuesta al brillo del sistema visual humano, b) colorimetría para televisión, de donde emergen los parámetros del color (crominancia y brillo) y la diferencia apenas perceptible (JND) de una imagen a color, y c) el principio de operación óptico de la televisión de retroproyección; los cuales son descritos a detalle en los siguientes capítulos.

# III Bases Psicofísicas de la visión humana

Las imágenes existen en tanto que existe un observador, que en el contexto de la televisión digital será un observador humano. Por esto las características relevantes de una imagen son aquellas que son perceptibles por el sistema visual humano. Como consecuencia, la importancia relativa de cada característica depende de la importancia que le da el sistema visual humano. De ahí la conveniencia de estudiar el procesador de imágenes biológico. Se profundizará sólo en las funciones del mismo que son relevantes en el diseño de los sistemas de transmisión de imágenes. Su conocimiento permite determinar cuáles son las variables a las que diseñadores y fabricantes de televisión digital deben atender, y para cada una de ellas permite determinar su intervalo de calidad; un intervalo cuyo límite inferior representa el mínimo imprescindible para alcanzar una calidad aceptable y cuyo límite superior marca la frontera que normalmente no conviene sobrepasar de modo significativo (Amura, 2004).

En el presente capítulo se abordan temas: percepción, fisiología del ojo humano, parámetros característicos del color y respuesta al brillo. A lo largo del capítulo se explican los principios que rigen dichos temas. Estos temas están relacionados con el diseño de los bloques que integran la compleja tecnología del despliegue de imágenes de una televisión.

### III.1 Percepción

De acuerdo con la teoría del umbral sensorial, todo sistema sensorial requiere de un nivel mínimo de intensidad de estimulación para ser accionado, los estímulos por debajo de dicho nivel resultarán imperceptibles para el sistema. Existen dos tipos de umbrales: el umbral absoluto y el umbral diferencial. El umbral absoluto (X<sub>0</sub>) establece que para que un estímulo sea captado por un sistema sensorial, es imprescindible que alcance cierto nivel de intensidad por debajo del cual el sistema no es activado. Los estímulos físicos de intensidad inferior a X<sub>0</sub> suscitan un nivel de sensación nulo. La sensibilidad (*s*) es el recíproco del umbral, la relación entre ambas magnitudes está dada por la expresión:

$$s = \frac{1}{X_0} \tag{1}$$

El sentido de la visión humana presenta un comportamiento determinado para los estímulos con intensidad superior al umbral absoluto. Manifiesta importantes limitaciones para detectar variaciones en la intensidad de un estimulo. El umbral diferencial (x) establece que es necesaria una diferencia mínima entre dos niveles de luminancia para que el sentido de la visión humana perciba dicha diferencia. El umbral diferencial es una magnitud física que esta asociada al estimulo y se expresa en las mismas unidades en que se mida aquél.

## III.2 Ley de Weber

El anatomista y fisiólogo, profesor de la Universidad de Leipzig, Ernst Heinrich Weber (1804 – 1891) observó que para mayores niveles de intensidad física de un estimulo, el incremento tiene que ser mayor para que la variación resulte perceptible. Estas observaciones las plasmó en la ley que lleva su nombre y establece que el umbral diferencial ( $\Delta x$ ) es proporcional a la intensidad (*I*) que en ese instante posea el estimulo, ilustrado en la Figura 4. La expresión formal del enunciado es:

$$\Delta x = k \cdot I \tag{2}$$

Donde la constante de proporcionalidad k recibe el nombre de constante de Weber.



Figura 4. Ley de Weber.

La transmisión digital de una señal obliga a discretizar la luminancia de una imagen. La ley de Weber aporta un criterio sólido para determinar en cuantos escalones se debe discretizar la luminancia, así como también la amplitud de cada escalón. Sugiere idealmente que la diferencia entre dos escalones consecutivos debe ser ligeramente menor al umbral diferencial, y que la discretización en niveles de luminancia bajos debe ser más fina que en los niveles altos.

## III.3 El ojo humano

El ojo humano es el receptor final de las imágenes generadas por las televisiones, es por esto que la mayoría de las mediciones y ajustes que se realizan a las televisiones están relacionadas con su capacidad de transmitir imágenes e información al espectador de manera eficiente, exacta y confortable (Keller, 1999). El ojo es un sistema de captura y transferencia de información visual altamente complejo. Los elementos en la retina sensibles a la luz convierten los fotones en señales eléctricas que son transferidas al cerebro manteniendo la información espacial de la imagen formada por los elementos ópticos.

### III.3.1 El ojo humano y la teoría del color

¿Cómo puede el ojo humano detectar y distinguir los colores que le llegan? La respuesta se encuentra en su fisiología. Básicamente es una cavidad óptica de 2 cm. de diámetro que colecta la luz y la enfoca en su superficie posterior, la retina, donde existen millones de células especializadas en detectar diferentes longitudes de onda ( $\lambda$ ) de la luz visible reflejada por los objetos en nuestro entorno (ver Figura 5). Estas células, los Conos y los Bastones, transforman la luz en impulsos eléctricos que son enviados a la corteza visual del cerebro a través de los nervios ópticos, siendo el cerebro el encargado de crear la sensación del color de una imagen.

En su mayoría, los Conos se concentran cerca del centro de la retina en la región llamada fóvea, distribuidos en un ángulo de 2º alrededor de esta. Son los responsables de la visión de color y hay tres tipos, sensibles al rojo, al verde y al azul, respectivamente (Figura 7a)). De aquí se origina el hecho de que, en general, la tecnología de generación de imágenes a color pueda ser alcanzada por la combinación de los tres colores primarios.



Figura 5. El ojo humano.<sup>1</sup>

Son poco sensibles a la intensidad de la luz y responsables de la visión fotópica, visión de día. Con una población estimada de 6 millones. Dada su forma de conexión a las terminaciones nerviosas que se dirigen al cerebro, son los responsables de la definición espacial.

Los Bastones responsables de la visión escotópica, visión nocturna, se concentran en zonas alejadas de la fóvea. La cantidad de Bastones se sitúa alrededor de los 100 millones y no son sensibles al color. Comparten las terminaciones nerviosas que se dirigen al cerebro, siendo por lo tanto su aportación a la definición espacial poco importante. Son mucho más sensibles a la intensidad luminosa que los Conos, por lo que aportan a la visión del color aspectos como el brillo y el tono (Piña, 2005). En la Figura 6 se presenta la distribución de los Conos y los Bastones en la retina dentro de la cavidad óptica.

<sup>1</sup> www.invlumer.e.telefonica.net/Planificando/CROMA



Figura 6. Distribución de Conos y Bastones en la retina<sup>2</sup>

### III.3.2 Sensibilidad y tipos de visión

Al igual que en la fotografía, la cantidad de luz juega un papel importante en la visión humana. La visión fotópica ( $V(\lambda)$ ) predomina en condiciones de iluminación mayores a 3,00 cd/m<sup>2</sup> como ocurre durante el día, la visión es nítida, detallada y se pueden distinguir bien los colores. La visión escotópica ( $V'(\lambda)$ ) predomina para niveles de iluminación menores a 0,25 cd/m<sup>2</sup>, desaparece la sensación del color y la visión es más sensible a los tonos azules, y a la intensidad de la luz. La visión mesópica es una condición intermedia que se presenta durante la transición entre las visiones fotópica y escotópica, donde la capacidad para distinguir los colores disminuye conforme el nivel de iluminación disminuye, pasando de una gran sensibilidad del amarillo – verdoso hacia el azul. Al desplazamiento de sensibilidad máxima se le llama efecto Purkinje, ver Figura 7 b). En estas condiciones se definen las curvas de sensibilidad del ojo humano a la luz visible para

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> http://micro.magnet.fsu.edu/primer/lightandcolor/humanvisionintro.html; The Florida State University

un observador promedio, que tiene sensibilidad máxima para la longitud de onda de 555 nm para la visión fotópica, y sensibilidad máxima para los 480 nm para la visión escotópica.



Figura 7. a) Curvas de sensibilidad de los Conos<sup>3</sup> b) Curvas de sensibilidad fotópica<sup>4</sup> y escotópica<sup>5</sup> del Observador Promedio

Durante la visión fotópica, el ojo contrae el iris, y la luz se enfoca sobre la fóvea. Debido a que cada Cono en la fóvea se comunica con una sola fibra del nervio óptico, la visión es más nítida, mejor definida y mantiene la información espacial de la imagen. Durante la visión escotópica, el ojo abre el iris para colectar más luz aumentando la aberración de esfericidad, la imagen se enfoca sobre la retina adquiriendo el ojo una miopía nocturna, y la visión es borrosa debido a que los Bastones comparten las fibras del nervio óptico

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> http://pub.ufasta.edu.ar/SISD/vision/respuestacolor.htm; Universidad Fasta.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), Compte Rendu, 6<sup>th</sup> session, Geneva, 1924, Cambridge University Press, 1926, p 67.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), "Light as a true visual quantity: principles of measurement" CIE publication No 41TC-1.4, 1978.

### III.3.3 Respuesta espectral del ojo humano

Como se ha descrito anteriormente, el ojo funciona de diferente forma de acuerdo con el nivel de iluminación. El espectro de luz visible para el ojo humano (Figura 8) abarca desde los 390 nm de longitud de onda para el color violeta hasta los 780 nm para el color rojo. Fuera de estos límites el ojo no percibe ninguna clase de radiación (Hecht, 2000).



Figura 8. Espectro de luz visible.<sup>6</sup>

### III.4 Parámetros característicos del color

Un color se define por 3 parámetros: Luminancia, longitud de onda predominante y pureza (Bosco).

La luminancia (L) es definida como la medición luminosa de la potencia radiada medida en  $cd/m^2$ . Subjetivamente se habla de luminosidad, y se dice que un color puede variar en luminosidad, de oscuro a claro, si tiene poco o mucho brillo.

La longitud de onda predominante  $(\lambda_d)$  es la longitud de onda de la radiación monocromática correspondiente, se dice que un color es amarillo, verde, azul etc. Subjetivamente se habla de matiz o tono.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Imagen de espectro: http://www.midnightkite.com/color.html; rango de valores en la imagen: Óptica; Hecht Eugene, Tabla 3.4 pag 77
La Pureza ( $\rho$ ) es una magnitud que representa que tan diluido en color blanco se encuentra un tono. Se representa por un índice variable entre 0 y 1. Subjetivamente se habla de saturación del tono, por ejemplo el color rosa es el resultado de un rojo poco saturado o muy diluido.



**Figura 9.** Representación gráfica de los parámetros del color mediante el espacio CIE HSV. Donde H corresponde al Tono (Hue), S a la Saturación (Saturation) y V al Brillo (Value)<sup>7</sup>.

#### III.4.1 Crominancia

Los parámetros anteriores: el tono y la pureza ( $\lambda_d$ ,  $\rho$ ), definen el término crominancia o cromaticidad. Expresado de esta manera, la crominancia pasa a ser una magnitud vectorial. Los parámetros del color pueden ser representados gráficamente (propuesto por la *Comission Internationale d l'Clairage*; CIE) mediante un cono invertido como el de la Figura 9, donde la altura es proporcional a la luminancia (L). De un corte transversal del cono se obtiene un círculo (círculo cromático) donde se indica la crominancia ( $\lambda_d$ ,  $\rho$ ). La saturación ( $\rho$ ) viene dada por la longitud del segmento radial, y el tono ( $\lambda_d$ ) por el ángulo formado respecto de una referencia. El corte transverso del cono permite estudiar la crominancia independientemente de la luminancia L.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> http://en.wikipedia.org/wiki/HSV\_color\_space

La intensidad radiante de una fuente luminosa, es determinada por la cantidad de flujo de energía radiada desde la fuente por unidad de tiempo, por ángulo sólido y unidad de área. Espectralmente, la luminancia es proporcional a la integración de la potencia de todas las longitudes de onda del espectro visible. El Brillo es definido por la CIE como la luminancia de una fuente luminosa, ponderada por la sensibilidad espectral característica de la visión humana (visión fotópica). La magnitud de la Intensidad, la Luminancia, es proporcional a una potencia física, pero la composición espectral de la Luminancia está relacionada con la sensibilidad de la visión humana.



Figura 10. Tono y Saturación. a) Tono definido por la longitud de onda dominante, rojo saturado<sup>8</sup>, b) rosa, rojo superpuesto en un fondo blanco, rojo no saturado<sup>9</sup>.

#### III.5 Respuesta al brillo

La sensibilidad del ojo para discriminar diferentes niveles de brillo es de relevancia para la presentación de imágenes, particularmente imágenes digitalizadas, esto es, mediante un conjunto discreto de niveles. El rango de niveles de intensidad de luz a los cuales puede

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> http://pub.ufasta.edu.ar/SISD/vision/parametrosvisuales.htm

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Hecht Eugene, fig 4.65, pag 136

adaptarse el ojo humano es del orden de 10<sup>10</sup> desde el umbral absoluto de percepción escotópica hasta el límite de encandilamiento. Evidencia experimental indica que el brillo subjetivo (el brillo percibido por el sistema visual humano) es una función logarítmica de la intensidad luminosa incidente en el ojo. Tal característica se indica en la Figura 11 en un grafico de brillo subjetivo (ordenada) contra la intensidad de la luz (abscisa, logarítmica). La línea sólida indica el rango de intensidades a los cuales puede adaptarse el ojo humano. Considerando sólo la visión fotópica el rango es del orden de 10<sup>6</sup>.



Figura 11. Niveles de intensidad percibidos por el ojo humano<sup>10</sup>.

La transición desde la visión escotópica hasta la visión fotópica es gradual, sobre un rango aproximado de 0.001 a 0.1 [miliambert] (-3 a -1 en la abscisa logarítmica), lo que se refleja por las dos ramas de la curva de adaptación en dicho rango. Una consideración fundamental o clave para interpretar el impresionante rango que indica la Figura 11, radica en el hecho de que el sistema visual no puede operar sobre todo ese rango de manera simultánea. Se logra la operación para tan grandes variaciones mediante cambios en su

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> http://pub.ufasta.edu.ar/SISD/vision/respuestabrillo.htm

sensitividad global, fenómeno conocido como "adaptación al brillo". El rango total de niveles de intensidad que puede ser discriminado simultáneamente es más bien pequeño en comparación con el rango total de adaptación.

## III.5.1 Respuesta y discriminación del brillo

Debido a que las imágenes digitales se presentan como un conjunto de puntos brillantes, la capacidad del ojo de discriminar entre diferentes niveles de iluminación es una consideración importante para presentar los resultados del procesamiento de imágenes. La relación entre la intensidad de la luz que entra al ojo y el brillo percibido no es una función lineal. Esto significa que a medida que la intensidad de una fuente luminosa cambia, el observador no percibirá un cambio igual en el brillo. La respuesta del ojo a la intensidad luminosa es logarítmica como se muestra en la Figura 12. Weber demostró experimentalmente que la variación en intensidad de una fuente luminosa debe ser cercana al doble de la intensidad antes de que el ojo pueda detectar que ésta ha cambiado (ver Figura 4). Por lo tanto, los cambios de cierta magnitud en la intensidad en regiones oscuras de una imagen tienden a ser más perceptibles que los cambios de la misma magnitud en regiones brillantes.



Figura 12. Respuesta logarítmica del ojo a la intensidad luminosa<sup>11</sup>.

En la Figura 13 a) se muestra una imagen junto con su curva de intensidad real (Figura 13 b)), la intensidad de las barras asciende de izquierda a derecha en incrementos iguales abarcando la escala de gris (variación del Brillo de un Tono). Como se esperaría de la curva en la Figura 12, las franjas en la región oscura de la imagen son fácilmente perceptibles, mientras que las de la región brillante tienden a ser indistinguibles. Es evidente que la diferencia en el brillo percibido de las franjas no parece igual, el ojo no puede distinguir un mínimo incremento de intensidad en las regiones brillantes como si lo hace en las regiones oscuras.

En las Figura 14 a) se muestra una escala de gris donde la intensidad de las barras asciende de izquierda a derecha igualando la respuesta logarítmica del ojo. En este caso, el brillo percibido de las franjas tiende a parecer igualmente espaciado y bien definido en las regiones brillantes, así como en las regiones oscuras, en la Figura 14 b). La respuesta logarítmica del ojo a la intensidad hace a éste más sensitivo a las variaciones de intensidad en las regiones oscuras que en las regiones brillantes de la imagen.

<sup>11</sup> http://pub.ufasta.edu.ar/SISD/vision/respuestabrillo.htm





Figura 13 a) Franjas de escala de gris con igual cambio de intensidad, b) intensidad real de la escala de gris.<sup>12</sup>

Figura 14 a) franjas de escala de gris que iguala la respuesta logarítmica del ojo, b) intensidad real de la escala de gris logarítmica.<sup>13</sup>

Como en cualquier sistema óptico, el ojo tiene límites para resolver detalles finos o transiciones de intensidad. Los factores limitantes son el número y organización de los fotorreceptores en la retina, la calidad de la parte óptica del ojo, y la transmisión y procesamiento de la información visual al cerebro. Generalmente la respuesta en frecuencia del ojo disminuye a medida que se ven transiciones de intensidad, que se vuelven más finas, como se observa en la Figura 15.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> http://pub.ufasta.edu.ar/SISD/vision/respuestabrillo.htm

<sup>13</sup> http://pub.ufasta.edu.ar/SISD/vision/respuestabrillo.htm



Figura 15. Patrón de frecuencia y contraste. Incremento de la frecuencia de izquierda a derecha y decremento del contraste de arriba abajo<sup>14</sup>.

Es también un factor el contraste, o diferencia entre niveles de gris, de la transición de intensidades. Entre más alto el contraste, más fino es el detalle que el ojo puede resolver. Finalmente, cuando las transiciones están demasiado finas o el contraste es demasiado bajo el ojo ya no puede resolverlos. En este punto, el ojo puede percibir solo un promedio del nivel de gris del área detallada. Lo discutido en este capítulo ilustra el complejo proceso que ocurre en el sistema visual humano para la visualización de imágenes.

<sup>14</sup> http://www.imatest.com/docs/log\_f\_Cont.html

## IV Colorimetría para televisión

En este capítulo se explican los fundamentos de colorimetría para televisión digital. Los modelos de color descritos CIE RGB, CIE XYZ y CIE u'v'Lv han sido seleccionados por su uso en los principales equipos de medición de color.

La colorimetría surge de la necesidad de normalizar la manera de clasificar y reproducir los colores, esta ciencia estudia la forma de medir, y desarrolla los métodos para cuantificar el color. El procedimiento para medir el color consiste, sustancialmente, en sumar la respuesta a los estímulos de colores con la normalización a la curva de respuesta espectral del fotorreceptor (colorímetro, ojo). Para el caso en que los colores son percibidos por un espectador humano, se utiliza la función colorimétrica (Observador Promedio) propuesta por la CIE en 1931. El matemático alemán Hermann Grassmann enunció las leyes sobre la mezcla aditiva del color. Ellas muestran que cualquier color (C) puede expresarse como la suma de tres colores primarios, es decir, tres colores tales que uno no puede obtenerse por la mezcla de los otros dos. Al aplicar las leyes de Grassmann se obtiene la denominada ecuación unitaria del color (Wikipedia/colorimetría). No existe un único grupo de colores primarios, los más frecuentemente utilizados para generar luz blanca y una amplia gama de colores son: el rojo (R; red), el verde (G; green) y el azul (B; blue). En la Figura 16 se resumen los resultados de la superposición de colores de luz primarios: la luz roja (R) sumada a la luz azul (B) se percibe como luz color magenta (M); la luz azul sumada a la luz verde (G) se percibe como luz color cian (c); y la luz roja

28

sumada a la luz verde se percibe como luz color amarillo (Y; yellow). La superposición de los tres colores de luz primarios da como resultado luz blanca (W; white) (Hecht, 2000).

Cian (c) Magenta Blanco (W) Verde (G (M) Amarillo (Y)

Figura 16. Colores de luz primarios superpuestos<sup>15</sup>.

Cualquier combinación de dos haces de luz coloreada que da como resultado el color blanco (W) se les denomina colores complementarios.

Colores de luz primar9ios (R, G, B):			R + G + B = W
Colores complementarios (M, Y, c):	$\underline{M+G=W},$	ya que	R + B = M
*	$\underline{c+R=W},$	ya que	B + G = C
	$\underline{Y+B=W},$	ya que	R + G = Y

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Óptica; Hecht Eugene, figura 4.64, página 136

## IV.1 Leyes de la Colorimetría

Herman Grassmann (1809-1877) fundó tres leyes que son las bases de la colorimetría moderna, a continuación se enuncian las leyes del color conocidas como las leyes de Grassmann:

- La primera ley de Grassmann establece que: cualquier color (C) de una fuente luminosa se puede igualar al superponer tres fuentes luminosas de colores primarios, y está dada por la ecuación:

$$C(\lambda) = r[R(\lambda)] + g[G(\lambda)] + b[B(\lambda)]$$
(3)

donde  $C(\lambda)$  es el color de la fuente de prueba,  $[R(\lambda)]$ ,  $[G(\lambda)]$ ,  $[B(\lambda)]$  representan el color de cada fuente primaria de una longitud de onda seleccionada, y r,g,b son las unidades de intensidad de cada fuente primaria.

 La segunda ley Grassmann establece que: el igualamiento de color que se logra al cumplir la primera ley, persiste para cualquier variación (n) de brillo (intensidad luminosa), y esta definido por la ecuación:

$$nC(\lambda) = nr[R(\lambda)] + ng[G(\lambda)] + nb[B(\lambda)]$$
(4)

- La tercera ley de Grassmann establece que: un tercer color  $C_3$  generado por la suma de otros dos colores  $C_1$  y  $C_2$ , puede ser igualado por la suma lineal de los colores primarios que igualan individualmente a  $C_1$  y a  $C_2$ , y está descrita por la ecuación:

$$C_{3}(\lambda) = C_{1}(\lambda) + C_{2}(\lambda) = (r_{1} + r_{2})[R(\lambda)] + (g_{1} + g_{2})[G(\lambda)] + (b_{1} + b_{2})[B(\lambda)]$$
(5)

Las ecuaciones anteriores son conocidas como ecuaciones colorimétricas, donde el signo de igualdad solamente indica que el color a la derecha de la ecuación, es visualmente idéntico al color de la izquierda, aun cuando sus distribuciones espectrales sean diferentes (Broadbent, 2006).

Existen algunos requisitos importantes para la validación experimental de la primera ley de Grassmann, estos requisitos son:

- La elección de los colores de las tres fuentes primarias de luz debe ser tal que: la mezcla de cualesquiera dos fuentes primarias no genere a la tercera.
- II. El nivel de iluminación debe ser relativamente alto para asegurar el uso exclusivo de la visión fotópica.
- III. El tamaño angular del campo visual se debe limitar a 2°, para asegurar que la luz incida en la región foveal de la retina, donde se localizan las células fotorreceptoras del ojo sensibles al color.
- IV. El observador que realiza el experimento debe ser capaz de percibir los tres colores primarios (visión de color normal) y no tener vista cansada.

El experimento de igualamiento de color se basa en la primera ley de Grassmann, donde el color de una fuente de prueba, con cualquier distribución espectral, puede ser igualado al mezclar tres fuentes de luz, comúnmente roja (R), verde (G) y azul (B). En una configuración típica para verificar esta ley (ver Figura 17), el campo visual del observador se divide en dos, una mitad es iluminada uniformemente mediante una fuente de prueba de luz monocromática, con intensidad constante y longitud de onda conocida. La otra mitad del campo visual, es iluminada uniformemente por la superposición de tres haces de luz de las tres fuentes primarias, cuyas intensidades se pueden variar independientemente. La intensidad requerida de cada una de las fuentes primarias, para que al mezclarse igualen el color de la fuente de prueba, puede ser medida en unidades de potencia radiada (watt/sr) o su equivalente en flujo luminoso (lumen/sr cd). Si se mide en unidades de intensidad luminosa, la condición de igualamiento puede ser expresada como una expresión colorimétrica de la forma:

$$LC(\lambda) = L_1[R(\lambda)] + L_2[G(\lambda)] + L_3[B(\lambda)]$$
(6)

Donde L es la intensidad luminosa de la fuente de prueba,  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  son las intensidades luminosas, valores escalares llamados triestímulos, necesarias de cada una de las fuentes primarias para igualar el color de la fuente de prueba.



Figura 17. Esquema conceptual del experimento de igualamiento de color.

El rango completo de colores percibidos por la visión humana (gamma ó gamut), es tan grande que resulta imposible cubrirlo completamente mediante la mezcla aditiva de tres fuentes primarias reales. En ocasiones para lograr igualar el color espectral de ciertas fuentes de prueba, o igualar un color altamente saturado, es necesario que uno de los valores triestímulo sea negativo. En estos casos, el color de prueba debe desaturarse mezclándolo con una de las fuentes primarias, y el color resultante, es entonces igualado por la mezcla de las dos fuentes primarias restantes en la otra mitad del campo visual, de esta manera puede cubrirse el rango completo de los colores que pueden ser percibidos por el sistema visual humano (Hoffmann, 2006). A continuación se presenta un ejemplo en el cual es necesario desaturar la lámpara de prueba cambiando el campo de visión de la lámpara roja, para lograr igualar el color espectral azul-verde es:

$$LC(\lambda) + L_1[R(\lambda)] = L_2[G(\lambda)] + L_3[B(\lambda)]$$
(7)

$$LC(\lambda) = -L_1[R(\lambda)] + L_2[G(\lambda)] + L_3[B(\lambda)]$$
(8)

se registra un valor de intensidad negativo para el estímulo de la fuente roja.

Un conjunto de colores que difieren solo en proporción de intensidad luminosa como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$LC(\lambda) = L_1[R(\lambda)] + L_2[G(\lambda)] + L_3[B(\lambda)]$$
(9)

$$n_1 L C_1(\lambda) = n_1 L_1[R(\lambda)] + n_1 L_2[G(\lambda)] + n_1 L_3[B(\lambda)]$$
(10)

$$n_2 L C_2(\lambda) = n_2 L_1[R(\lambda)] + n_2 L_2[G(\lambda)] + n_2 L_3[B(\lambda)]$$
(11)

forman una serie de estímulos con la misma distribución espectral pero con diferentes niveles de brillo. En esta serie de tres, el color mantiene su cromaticidad aunque la sensación del color percibido por el observador cambie al variar el brillo, por ejemplo, el color blanco mantiene su cromaticidad aunque al disminuir su brillo sea percibido como gris. Es práctico especificar tales colores de cromaticidad constante por medio de coordenadas cromáticas, las cuales pueden ser expresadas por la ecuación tricromática unitaria:

$$C_i(\lambda) = r[R(\lambda)] + g[G(\lambda)] + b[B(\lambda)]$$
(12)

donde:

$$r = \frac{L_1}{L_1 + L_2 + L_3} \qquad g = \frac{L_2}{L_1 + L_2 + L_3} \qquad b = \frac{L_3}{L_1 + L_2 + L_3}$$
(13)

Al normalizar los valores de luminancia (L), la suma de las coordenadas cromáticas es igual a la unidad (r+g+b = 1). Este hecho permite la representación de los parámetros cromaticidad (r, g, b) y brillo (Lv) independientemente. Así, las coordenadas cromáticas pueden ser representadas por un par coordenado en una gráfica rectangular bidimensional, usando solo dos de las coordenadas, por ejemplo r y b, ya que la tercer coordenada puede ser fácilmente despejada (g=1-r-b).

## IV.2 Representación del color

A un modelo matemático abstracto que describe la manera en que los colores pueden ser representados por un conjunto de números, se le llama modelo de color. Debido a la fisiología del sistema visual humano, se necesitan tres números para representar a un color dentro de un modelo. Todo modelo de color debe de contar con una función que lo represente gráficamente en un espacio, conocido como espacio de color, donde a cada color se le asigna una posición o coordenada única. A los colores primarios se les asigna un eje coordenado y al mezclarlos en diferentes magnitudes se genera la gama de colores del espacio de color. Solo a través del espacio de color, un modelo de color tiene conexión con cualquier aplicación práctica. Debido a que un espacio de color representa los colores en función de un marco de referencia absoluto, modelo de color, es posible representar un color análogo o digital mediante un espacio de color (Wikipedia/Color space).

## IV.3 El modelo de color RGB.

En el año de 1928, W.D. Wright trabajando en el Colegio Imperial de Londres, y J. Guild en el Laboratorio Nacional de Física cerca de Londres en 1931, llevaron a cabo de manera independiente experimentos de igualamiento de color, que eventualmente fundaron las bases para la especificación del modelo de color CIE RGB. Ambos investigadores igualaron el color de distintas fuentes de prueba de luz monocromática, mezclando luces de colores primarios rojo (R), verde (G) y azul (B) diferentes. Los experimentos de ambos se llevaron a cabo de acuerdo con los requerimientos necesarios para satisfacer la primera ley de Grassmann, y mediante la configuración típica para comprobar esta ley (Broadbent, 2006).



Figura 18. Curvas de igualamiento de color del modelo de color RGB<sup>16</sup>.

A pesar de que en sus experimentos Wright y Guild, utilizaron fuentes primarias diferentes y diferentes niveles de intensidad, fue posible unir sus resultados para formar la el modelo de color CIE RGB, gracias a que la percepción del color por el sistema visual humano es lineal, de acuerdo con las leyes de Grassmann. En el año de 1931 después de mucho deliberar, la *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE), estandarizó los colores de las fuentes primarias; para la fuente de color rojo seleccionó una fuente que emitiera luz monocromática de 700nm, [R(700)], 546.1nm para la fuente verde [G(546)] y 435.8nm para la fuente azul [B(435)], al realizar esto, la CIE estableció una notación internacional para describir el color. Las funciones de igualamiento de color  $\overline{r}(\lambda), \overline{g}(\lambda), \overline{b}(\lambda)$  del modelo de color CIE RGB obtenidas luego de adecuar linealmente los resultados de Wright y Guild con las nuevas fuentes de color primario, son las que se muestran en la Figura 18. Estas funciones definen para cada caso particular, lo que se conoce como el Observador Promedio. Estas curvas representan la relación de la intensidad relativa (*r*, *g*, *b*) de cada lámpara primaria [R( $\lambda$ )],[G( $\lambda$ )],[B( $\lambda$ )], en función de la longitud de

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> http://en.wikipedia.org/wiki/CIE 1931

onda, eje horizontal, a lo largo del espectro visible (Wikipedia/Color space). En las funciones de igualamiento de color (CMF; color matching functions), las curvas se han normalizado para que tengan igual área bajo la curva, el valor del área bajo la curva ha sido seleccionada igualando la curva de la lámpara verde  $\overline{g}(\lambda)$  con la función fotópica  $V(\lambda)$ , al hacer esto, se ha seleccionado a la lámpara verde para representar la medición de brillo de un color, y las lámparas roja y azul representan la cromaticidad.

$$g(\lambda) = V(\lambda) \tag{14}$$

El modelo de color CIE RGB puede ser usado para especificar la cromaticidad del color de la manera usual:

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$
 (15)

donde r, g y b son las coordenadas cromáticas, y R, G y B los valores triestímulo.

#### IV.4 Modelo de color XYZ

También conocido como CIE 1931 o CIE *xy*Lv; fue uno de los primeros modelos de color definidos matemáticamente, desarrollado por la CIE en el año de 1931, basado en el modelo de color RGB y sus funciones de igualamiento de color  $\overline{r}(\lambda), \overline{g}(\lambda), \overline{b}(\lambda)$ . La transformación lineal del modelo de color RGB al modelo XYZ se logra mediante la matriz de transformación determinada por la CIE:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \frac{1}{0.17697} \begin{bmatrix} 0.49000 & 0.31000 & 0.20000 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00000 & 0.01000 & .099000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix}$$
(16)

El nuevo espacio de color CIE XYZ esta definido por las funciones de igualamiento de color  $\overline{x}(\lambda), \overline{y}(\lambda), \overline{z}(\lambda)$  que se muestran en la Figura 19. Los correspondientes valores triestímulo X, Y, Z se obtienen mediante las ecuaciones:

$$X = \int_{360}^{830} \bar{x}(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda, \quad Y = \int_{360}^{830} \bar{y}(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda, \quad Z = \int_{360}^{830} \bar{z}(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda$$
(17)

donde  $\Phi(\lambda)$  representa la distribución de potencia espectral de la lámpara de prueba. La función  $\overline{y}(\lambda)$  ha sido igualada a la función fotópica  $V(\lambda)$  para representar el brillo, mientras que la cromaticidad se representa con las funciones  $\overline{x}(\lambda)$ ,  $\overline{z}(\lambda)$ . El cálculo numérico de los valores triestímulo se realiza mediante las sumatorias:

$$X = \sum_{360}^{830} \overline{x}(\lambda) \Phi(\lambda) \Delta \lambda, \quad Y = \sum_{360}^{830} \overline{y}(\lambda) \Phi(\lambda) \Delta \lambda, \quad Z = \sum_{360}^{830} \overline{z}(\lambda) \Phi(\lambda) \Delta \lambda$$
(18)

donde  $\Delta \lambda$  indica el paso (1nm ó 5nm) entre muestras de longitudes de onda.



Figura 19. Curvas de igualamiento de color del modelo de color CIE XYZ<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> http://en.wikipedia.org/wiki/CIE\_1931

Las coordenadas cromáticas x, y, z dan forma al espacio de color (diagrama cromático xyLv) para representa gráficamente el modelo de color CIE XYZ. Las coordenadas cromáticas se calculan mediante las ecuaciones:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$
 (19)

Los valores triestímulos pueden ser calculados si se conoce el valor de las coordenadas cromáticas y el valor del brillo, mediante las ecuaciones:

$$X = \frac{Y}{y}x, \qquad Z = \frac{Y}{y}(1 - x - y)$$
(20)

## IV.5 Diagrama cromático CIE xyLv

Ya que el ojo humano posee tres fotorreceptores sensibles a diferentes longitudes de onda, es una gráfica tridimensional la que representa correctamente todos los colores que puede percibir un observador promedio, esta gráfica es conocida como el gamut tridimensional de la visión humana. El gamut tridimensional del modelo de color XYZ se muestra en la Figura 20 a) (Hoffmann, 2006). Las coordenadas cromáticas encerradas dentro del diagrama cromático xyLv son proyectadas desde el gamut tridimensional XYZ, siendo el origen del sistema tridimensional el centro de proyección (Figura 20 b)). Todos los diferentes valores de brillo de un mismo color son proyectados al mismo punto en el plano coordenado del diagrama cromático xyLv. Es así como el diagrama cromático contiene todos los colores perceptibles por una persona, en un plano de brillo constante (Y=1).



Figura 20. a) Gamut tridimensional del modelo de color CIE XYZ, b) proyección del diagrama cromático tridimensional a un plano<sup>18</sup>.

Debido a su forma, el diagrama cromático xyLv en ocasiones es nombrado como diagrama herradura. Los parámetros del color representados en el diagrama cromático xyLv son longitud de onda dominante (tono;  $\lambda_d$ ) y pureza (saturación;  $\rho$ ). En la Figura 21 b), la línea roja que delimita al diagrama cromático es conocida como línea espectral, sobre ella se encuentran los colores espectrales monocromáticos, los cuales poseen una saturación del 100%. La línea recta que une la región roja con la región azul del espectro visible es conocida como la línea púrpura, y a pesar de que también lo delimita, estos colores no son monocromáticos. Los colores van perdiendo saturación conforme se alejan de la línea espectral y se acercan al centro, tornándose en tonos pastel y finalmente blancos (Keller, 1997).

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Hoffmann Gernot; http://www.fho-emden.de/~hoffmann/howww41a.html; archivo: ciexyz29082000



Figura 21. a) Diagrama cromático  $CIExyLv^{19}$ , b) línea espectral, la línea del cuerpo negro y línea púrpura en el diagrama cromático.

La longitud de onda dominante es determinada por el corte hecho a la línea espectral por la línea recta que une el punto del color en cuestión con el punto acromático (o cualquier punto de referencia). Se considera a la coordenada cromática (x= 1/3, y=1/3) como el punto central del diagrama cromático, y de acuerdo con sus valores triestímulo, esta coordenada representa una distribución de potencia espectral plana, que es percibida como un color blanco (acromático). Una propiedad del diagrama *xy*Lv es que la línea recta que une dos puntos cualesquiera, contiene todas las mezclas de color que se pueden obtener por la mezcla aditiva de los colores representados por los puntos coordenados. De igual forma, todos los colores que resultan de mezclar tres colores, se encuentran dentro del triangulo formado por las rectas que unen a los tres colores. Sin embargo, en el diagrama *xy*Lv las distancias que separan a los colores no corresponden a la diferencia que existe entre ellos, es decir, el color resultante de la mezcla de dos colores con igual magnitud, no

<sup>19</sup> http://en.wikipedia.org/wiki/CIE\_1931

se encontrará en el punto medio de la recta que los une, debido a que el diagrama *xy*Lv no representa uniformemente el gamut de colores percibidos. La línea negra dentro del diagrama es conocida como la línea del cuerpo negro. Esta línea describe el cambio de color que sufre un cuerpo negro al ser calentado a tan alta temperatura que empieza a radiar luz visible, emitiendo primero luz roja, conforme se incrementa la temperatura del cuerpo negro, aumenta la energía radiada y se acorta la longitud de onda cambiando el color percibido de rojo a amarillo, a blanco y finalmente a azul (Rea y Deng, 2006). La cromaticidad de cualquier color que se encuentre sobre la línea del cuerpo negro o en sus vecindades, puede ser especificada por la temperatura de color o una temperatura de color correlacionada (IESNA, 2007).

Al observar la Figura 21, es evidente la imposibilidad de reproducir completamente el gamut de la visión humana mediante tres fuentes primarias, ya que geométricamente no existen tres puntos en el diagrama que lo cubran completamente.

## IV.6 Elipses de MacAdam

Después de desarrollar un modelo y/o un espacio de color que diferencia mediante coordenadas cromáticas a un color de otro, es necesario determinar que tan diferentes son los colores entre ellos. Es decir, qué tan apartados se encuentran los colores dentro de un espacio de color. La respuesta a esta pregunta fue dada primero por el presidente de la Sociedad Americana de Óptica, D. L. MacAdam en el año de 1942. Fue mediante un experimento en el que un observador (Perley G. Nutting, Jr; observador PGN) y el mismo

MacAdam, igualaron el color de 25 lámparas de prueba diferentes identificadas en el diagrama cromático xyLv (Figura 22 a)), donde la cromaticidad de cada lámpara se encuentra en la coordenada central de cada elipse (MacAdam, 1942). El experimento se vió limitado solamente por el grado de exactitud con la que el sistema visual humano puede diferenciar o igualar los colores (umbral diferencial). Sin embargo, MacAdam observó que todas las variaciones en las lecturas de crominancia donde el color de prueba era igualado, formaban una elipse alrededor del color de la lámpara de prueba. En el estudio de la percepción del color, una elipse de MacAdam quedó definida como una región en el diagrama cromático que encierra colores diferentes, pero que para un observador promedio estos colores parecen todos el mismo. Las elipses de MacAdam son la base para la evaluación de calidad de imagen en la industria del procesado de imágenes, mediante la unidad de medida conocida como JND (Just Noticeable Differences). Las elipses de MacAdam varían en tamaño de acuerdo a su posición dentro del diagrama cromático, debido a la no uniformidad del mismo para representar la diferencia entre los colores. Una elipse de MacAdam define un método para medir distancias en el espacio de color xyLv, el cual posee una métrica Euclidiana (Wikipedia/MacAdam ellipse). La diferencia entre dos colores cualesquiera puede ser calculada sustituyendo sus coordenadas cromáticas en la siguiente expresión:

$$\Delta xy = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$
(21)



Figura 22. Elipses de MacAdam en el espacio de color: a) CIExyLv, b) CIE $u'v'Lv^{20}$ 

La Comission Internationale d l'Eclairage decidió implementar un espacio de color basando en el trabajo realizado por D. L. MacAdam. En el espacio de color resultante, CIEu'v'Lv, la distancia que separa a los colores representa mejor el grado de diferencia entre ellos, sin embargo este sistema no esta totalmente libre de distorsión.

#### IV.7 Espacio de color CIE u'v'Lv

Gracias a la linealidad del sistema visual humano para percibir el color, es posible realizar la transformación directa del espacio de color CIE xyLv al espacio de color CIE u'v 'Lv mediante las ecuaciones:

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \qquad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \tag{22}$$

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org; chapter 17

También es posible obtener las coordenadas cromáticas u'v' a partir de los valores triestímulo X,Y,Z de la siguiente manera:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \qquad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$
(23)

El mapeo de las ecuaciones anteriores dan origen al diagrama cromático u'v'Lv, el cual está casi libre de distorsión y representa los colores de una manera más uniforme que el espacio de color *xy*Lv.



Figura 23. a) Diagrama cromático  $CIEu'v'Lv^{21}$ , b) línea espectral, la línea del cuerpo negro y línea púrpura en el diagrama cromático.

La diferençia de color en este espacio de color se calcula de igual manera por las elipses de MacAdam:

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}$$
(24)

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org; chapter 17

### IV.8 Diferencia de color apenas perceptible

Existe una escuela de pensamiento dentro del campo de evaluación de imágenes en el que la meta de un procesador de imágenes es crear una imagen que sea perceptualmente equivalente a la imagen original. Esta escuela mide la degradación de la imagen en unidades de *diferencia apenas perceptible* (JND; Just Noticeable Differences), entre la imagen original y su contraparte procesada. Un JND corresponde a una probabilidad fija (p. e. 50 ó 75 %) de que un observador detecte la diferencia entre dos imágenes o regiones de las mismas. La evaluación de la calidad de una imagen basada en JND, está fundamentada por la teoría umbral, la cual establece que la detección de una señal ocurre solo cuando el estímulo sobrepasa el nivel umbral (ley de weber). En el contexto de JND, la calidad de una imagen esta determinada por la diferencia entre ésta y la original, si la diferencia es menor al umbral diferencial, entonces las imágenes son de igual calidad. Los defensores de esta escuela argumentan que es un método objetivo, que mide cualidades subjetivas de la calidad de una imagen, y predice para el observador promedio, la detección o discriminación de variaciones en la imagen (Barrett y Myers, 2004).

#### IV.9 RGB para televisión

Hasta hace una década todas las televisiones eran iguales, desde el punto de vista de la reproducción del color. Todas basadas en la tecnología del CRT compartiendo prácticamente el mismo gamut, el cual era limitado por el tipo de fósforo utilizado para generar las imágenes a color. Con el surgimiento de las nuevas tecnologías tales como los

dispositivos de cristal líquido (LCD), es posible cambiar el gamut tradicional de la televisión, existe la capacidad de expandir el gamut incluso más allá del gamut de la NTSC (National Television System Committee). Estas nuevas tecnologías se basan en los sistemas de tres colores primarios (RGB) o en sistemas de color multi-primarios, 4 ó más primarios, (Roth *et al*, 2003). La flexibilidad que ofrecen las nuevas tecnologías es el poder elegir los colores primarios para el diseño del gamut de un televisor de acuerdo a los requerimientos de la aplicación, una de las cuales se encuentra en el ramo de la televisión y el entretenimiento en casa, donde existe amplia evidencia de que el realce de la saturación de los colores primarios contribuye a una mejor experiencia visual, lo que se refleja en la expansión del gamut sobre el diagrama cromático xyLy (Moshe *et al*, 2007).



Figura 24. Diferentes gamuts de tecnologías de televisión: a) tecnología de 5 colores primarios para una televisión de proyección<sup>22</sup>, b) comparativo entre gamut de televisión de cristal líquido y proyección<sup>23</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> S. Roth, et al; Genoa color technologies.

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Moshe Ben Chorin, et al; Genoa color technologies.

De acuerdo con la Figura 24, es claro que la traducción de una misma señal dará diferentes colores para cada tecnología. Es obvio que el diseño del color para televisión se deriva de los límites tecnológicos y no de los meritos en calidad del color.

# V Óptica de una TVRP

En el presente capítulo de esta tesis se describe la óptica que posee una televisión de retroproyección, particularmente del bloque óptico en el cual se forma la imagen, y de la composición y características que posee la pantalla de una televisión de retroproyección.

#### V.1 Introducción

La televisión de retroproyección, basada en la tecnología de moduladores de cristal líquido operado en modo de transmisión (microdisplay, LCD), es un instrumento innovador cuyas dimensiones de pantalla permiten al espectador experimentar una sensación de visión como si tuviera un cine en casa y la sensación de estar dentro de la escena. La tecnología óptica de proyección es la responsable de la manipulación de la luz y la generación de las imágenes a color dentro de estas televisiones.

La evolución de la tecnología de tubo de rayos catódicos (CRT) a la tecnología de microdisplays, está alimentada por la demanda y normalización internacional de la televisión digital de alta definición (HDTV) para el año 2008 en los EEUU. En respuesta a esto, muchas tecnologías de despliegue de imágenes han sido introducidas dentro del mercado, basadas en tecnologías de pantalla plana y sistemas de proyección. Los sistemas de proyección principales están basados en tecnologías de microdisplay del tipo procesamiento de luz digital (DLP) y microdisplays de cristal líquido (LCD, LCOS). Las tecnologías de televisión basadas en sistemas de proyección generalmente están

constituidas por los bloques principales: fuente de luz, motor óptico, lente y pantalla de proyección que se muestran en la Figura 25.

Entre las tecnologías del despliegue de imágenes de gran tamaño (46" - 70"), la tecnología de proyección ofrece menos barreras técnicas para incrementar el tamaño de la pantalla, esto permite la generación y proyección de imágenes en moduladores del tamaño de una estampilla (~1"x1"), con una amplificación limitada únicamente por la intensidad de la fuente de iluminación. Últimamente los proyectores basados en la tecnología DLP han incrementado su participación en el mercado, estos dispositivos operan el color y escala de gris usando un panel que contiene un arreglo de espejos micro-electromecánicos (MEMS). Sin embargo debido a la proyección secuencial de los colores, esta tecnología presenta distorsiones del color, como el efecto arco iris, efecto visual no deseable que ocasiona fatiga visual en algunos espectadores. Por otro lado, las tecnologías de proyección basadas en microdisplays de LCD, los colores y sus escalas de gris son modulados por tres paneles de LCD, este sistema no presenta el efecto arco iris consiguiendo una excelente reproducción de imágenes en movimiento. La tecnología de microdisplay dominante, ha sido la del cristal líquido de polisilicio de alta temperatura (HTPS) que funciona en modo de transmisión y es el usado en las televisiones de retroproyección (Robinson et al, 2005).

A pesar de la similitud entre las televisiones de retroproyección, los sistemas ópticos internos son diferentes dependiendo del dispositivo de visualización (EPSON, 2005). Los proyectores disponibles en el mercado usan uno de los siguientes tres sistemas:



Figura 25. Diagrama esquemático de una televisión de retroproyección (RPTV).<sup>24</sup>

- Tecnología 3LCD. Es el sistema más usado en el mundo. Los LCD (HTPS) son moduladores de luz donde se genera la imagen en los tres colores primarios. Las tres imágenes superpuestas son proyectadas hacia la pantalla.
- Tecnología DLP. Esta tecnología utiliza micro-espejos digitales (DMD; Digital Micromirror Device) patente de Texas Instruments, como elementos de visualización. El DMD es un semiconductor con espejos independientes de dimensiones micrométricas, cada espejo corresponde a un píxel que refleja la luz de la fuente.
- Tecnología LCOS. Esta tecnología forma un panel de LCD con gran relación de área que funciona en reflectancia. Debido a que todo el cableado y elementos interruptores se encuentran por debajo de la capa reflectiva del panel, por lo que las imágenes aparecen ininterrumpidas.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Robinson Michael G., *et al*, 2005 Figura 2.7 pag 31 http://www.3lcd.com/es/ftr ts\_s.html

## V.2 Bloque óptico: principio de operación

El principio de operación del bloque óptico utilizado en una televisión de retroproyección, está basado en el sistema de 3 paneles de microdisplay de LCD. En la Figura 26 b) se muestra el diagrama esquemático. Es dentro del bloque óptico donde se forman las imágenes digitales desplegadas en la pantalla. Cada panel operando en transmisión, es iluminado por un haz de luz uniforme (rojo, verde o azul), posteriormente, las imágenes generadas son combinadas en una imagen final, que es amplificada y proyectada hacia la pantalla de la televisión. Las principales características de las imágenes generadas por este sistema son:

- <u>Imágenes luminosas</u>. Las imágenes poseen gran brillo debido a que la luz de los tres colores primarios es proyectada continuamente.
- <u>Naturales</u>. La selección de colores primarios encierra una amplia gama cromática, la excelente reproducción de las escalas de gris de los tres primarios permite la reproducción de imágenes detalladas.
- <u>Agradables a la vista</u>. La imagen que se ve en la pantalla es el resultado de la superposición de las tres imágenes de colores primarios, de esta manera se elimina el efecto arco iris logrando reproducir imágenes de movimiento suave.

A continuación se describen las componentes del bloque óptico siguiendo la trayectoria de la luz que éstas señalan, de acuerdo con el esquema mostrado en la siguiente figura.



Figura 26. Bloque óptico de una RPTV de microdisplay: a) ilustración, b) diagrama esquemático<sup>25</sup>,

## V.3 Sistema de iluminación del bloque óptico

El sistema de iluminación de una RPTV se conforma de: la lámpara, el filtro UV/IR, el sistema de lentes integradoras, un sistema de conversión de polarización y una lente condensadora, los cuales son explicados a continuación.

#### V.3.1 Lámpara

El bloque óptico se alimenta de una lámpara de ultra alta presión (UHP) con filamento de mercurio y amplio espectro de emisión que va desde luz ultravioleta (UV) hasta luz

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Barocio Daniel, 2006. "Grand Wega Optical Block Characterization"

infrarroja (IR) (ver Figura 27), con una temperatura de color de 9000 K y coordenadas cromáticas (x=0.287, y=0.292). La lámpara está compuesta por un reflector elíptico y una lente divergente (PHILIPS Specifications). Ajustando la presión de funcionamiento a más de 200 atmósferas se reduce el radio de la fuente, lo que hace que está se aproxime más a una fuente puntual, facilitando el diseño óptico (EPSON, 2005).



Figura 27. Distribución de potencia espectral típica de una lámpara de mercurio UHP de 100 w y 120 w.<sup>26</sup>

#### V.3.2 Filtro para el control del UV

Como ya se mencionó, las lámparas de mercurio UHP emiten, además de luz visible, luz ultravioleta (UV) y luz infrarroja (IR). En general, la luz UV con longitudes de onda menores a 400nm y la luz IR con longitudes de onda mayores a 700nm contribuyen poco o nada a la luminancia y colorimetría de un proyector (Stupp, 1999).

La luz UV tiene dos efectos negativos para este sistema. El primero es que la energía del UV puede ser absorbida y calentar los componentes que la absorben. El segundo problema es de mayor seriedad, los materiales orgánicos son significativamente degradados

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Stupp Edward H., 1999. Figura 8.4 pag 183

por la exposición a luz UV. Los materiales orgánicos en un proyector típico incluyen: lentes de plástico, polarizadores, películas retardadoras y cristales líquidos. Para proteger adecuadamente estos componentes, es necesario bloquear el UV antes de que alcance al primero de ellos. Una forma de bloquear la luz UV es mediante un filtro de vidrio, que funciona por absorción, por ejemplo el filtro pasa - largas L-42 que se muestra en la Figura 28.



Figura 28. Curvas de transmitancia de diferentes filtros de absorción.<sup>27</sup>

Filtros de este tipo son muy efectivos en bloquear el UV sin pérdidas importantes de luz visible. En los proyectores de alta potencia, o proyectores con diámetros de haz muy pequeños, la densidad de potencia de luz UV puede ser los suficientemente alta para causar fractura térmica en el filtro de absorción de UV. En estos casos, un filtro de UV dicroico dieléctrico puede ser utilizado y la luz UV es reflejada hacia la lámpara. La mayoría de la luz UV es eventualmente absorbida por el sistema lámpara-reflector. Una desventaja de los filtros dicroicos es que normalmente no rechazan la luz UV totalmente como los filtros de

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Stupp Edward H., 1999. figura 7.13 pag 103

absorción. De ser necesario, es posible combinar filtros dicroicos y filtros de absorción para prevenir daño a los filtros y otros componentes del proyector, ver Figura 29



Figura 29. Sistema de filtrado del UV de la luz visible emitida por la lámpara de mercurio UHP.<sup>28</sup>

#### V.3.3 Filtros para el control del IR

La luz IR representa solamente un problema térmico. Las componentes ópticas que son transparentes a la luz visible pueden ser opacas a la luz IR. Si existe luz IR en el haz de luz transmitido por el bloque óptico, ésta será absorbida por las componentes ópticas y se calentarán, provocando esfuerzos en las componentes. Los filtros de absorción de vidrio son un problema en este aspecto, los esfuerzos inducidos pueden llegar a desalinear el sistema óptico. Los polarizadores de ioduro son otro problema técnico porque el calor puede causar al ioduro sublimarse del polarizador. Debido a esto y otros problemas relacionados, es necesario eliminar la luz IR prácticamente al salir de la lámpara, lo cual se logra mediante un espejo frío depositado a manera de recubrimiento sobre el reflector de la lámpara. Un espejo frío dieléctrico transmite la luz IR y refleja la luz visible como se muestra en la Figura 30 a). Cuando la luz alcanza al reflector, la luz visible es reflejada y

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Stupp Edward H., 1999. Figura 7.20 pag 110.
concentrada en el haz mientras que la mayor parte de la luz IR es transmitida por el espejo frío.



Figura 30. Transmitancia de los espejos dieléctricos: a) Frío, b) Caliente.<sup>29</sup>

Si persisten los problemas térmicos y se requiere más protección contra luz IR, se utiliza un espejo caliente entre la lámpara y el primer componente óptico. La transmitancia espectral del espejo caliente se muestra en la Figura 30 b), el cual refleja la luz IR de regreso hacia la lámpara y transmite la luz visible hacia el bloque óptico. En la Figura 31 se muestra el espectro de emisión característico de las lámparas de mercurio de ultra alta presión, una vez que se le ha filtrado la luz UV y la luz IR. Aunque esencialmente blanco, este espectro es deficiente en el rojo y pronunciado en el verde, la distribución de energía de este espectro requiere un control adecuado del balance de color.

La luz que emerge de la lámpara, libre de UV/IR es típicamente seguida de un sistema de lentes integradoras y un sistema de polarización, descrito a continuación.

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Stupp Edward H., 1999. Figura 7.21, Pag 112.



Figura 31. Potencia espectral característico de una lámpara de mercurio UHP<sup>30</sup>

#### V.3.4 Lente Integradora

El sistema de lentes integradoras tienen dos funciones, la primera es producir una iluminación uniforme sobre el modulador óptico (microdisplay), la segunda es cambiar la sección transversal circular del haz de luz de la lámpara, por una sección transversal rectangular que iguale el área del modulador óptico. Normalmente, los proyectores de microdisplays utilizan iluminación critica como se muestra en la Figura 32 a).

En este tipo de iluminación el reflector de la lámpara o la lente condensadora, enfoca el arco o filamento de la lámpara sobre el modulador óptico. Provocando una distribución gaussiana de la intensidad de la luz incidente en el modulador, como se muestra en la Figura 32 b).

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Robinson Michael G., 2005. Figura 2.7 pag 31



**Figura 32.** Sistema de iluminación crítica a) reflector elíptico y lente negativa, b) perfil de distribución de intensidad de la luz visible incidente en el modulador (microdisplay).<sup>31</sup>

Esto significa que el contraste que genera el modulador será variante con la posición en el modulador, lo cual no es deseable. Por medio del uso de un sistema integrador de iluminación crítica, se puede corregir lo anterior y tener una iluminación uniforme a lo largo del modulador.

En la Figura 33 se muestra un arreglo de lentes llamados lente ojo de mosca o "fly's eye lens" formando un sistema integrador básico. El sistema consiste de dos placas integradoras, las que pueden o no ser idénticas. Debido a costos de diseño, fabricación y alineación, sistemas integradores con dos placas idénticas son más comunes en producción. Un ejemplo de un lente integrador es el arreglo de 3x4 mini-lentes mostrado en la Figura 33, donde cada elemento tiene una razón dimensional de 4:3. La razón dimensional de los mini-lentes en la primera placa integradora debe ser acoplada a la proporción dimensional del modulador óptico.

La forma más común del sistema integrador requiere de luz colimada, tal como la luz producida en conjunto por el reflector elíptico de la lámpara y la lente negativa. Cada uno

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> Stupp Edward H., 1999. Figuras 7.24 y 7.25, Pag 115.

de los 12 mini-lentes de la primera lente integradora forma la imagen de la fuente, sobre el centro del mini-lente correspondiente en la segunda lente integradora. Formándose un arreglo de 12 mini-fuentes virtuales.



Figura 33. Sistema de lentes integradoras (fly's eye lens).<sup>32</sup>

Cada mini-lente en el segundo arreglo actúa como un lente de campo, y en conjunto con una lente auxiliar, forman la imagen del mini-lente correspondiente de la primera lente integradora sobre el modulador. Por consiguiente, la distribución de la luz en el cono de luz es la suma de todas distribuciones de luz de los mini-lentes del primer arreglo. Para que este sistema trabaje correctamente, el foco de los mini-lentes en cada lente integradora debe ser igual y la separación entre las dos lentes integradoras debe ser igual a la distancia focal.

La Figura 34 muestra como el efecto combinado de los dos arreglos de mini-lentes promedia la distribución de intensidad de la luz. Como se observa en esta figura, cuando se

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Stupp Edward H., 1999. Figura 7.26, Pag 117.

tiene una iluminación crítica, la distribución de luz decrece desde el centro hacia la orilla. El mini-lente #1 (esquina superior izquierda) es mostrado en el inciso (b) de la figura, las líneas indican que la esquina inferior derecha es más brillante que la esquina superior izquierda del mismo.



Figura 34. Efecto de iluminación uniforme debido al sistema de lentes integradoras.<sup>33</sup>

El mini-lente #12 en la esquina diagonalmente opuesta, inciso (c), presenta la situación inversa, la esquina inferior derecha tiene menos brillo que la esquina superior izquierda del mismo. En el inciso (d) se muestra el caso en que la luz proveniente de un número grande de mini-lentes es sobrepuesta, las asimetrías en pares diagonales de mini-lentes tienden a cancelarse y la distribución de luz se vuelve uniforme.

#### V.3.5 Sistema de conversión de polarización

El sistema de lentes integradoras mejora la distribución de la uniformidad de la luz incidente en los moduladores ópticos. Estos últimos requieren de luz polarizada

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> Stupp Edward H., 1999. Figura 7.27, Pag 118.

verticalmente, por esto es necesario un sistema de conversión de polarización (SCP). Este sistema descompone el estado de polarización aleatoria de la luz de la lámpara, en sus estados de polarización ortogonales P (paralelo al plano de incidencia) y S (normal al plano de incidencia) por medio de un divisor de haz, como se muestra en la Figura 35.

El estado de polarización S es reflejado por el divisor de haz hacia un espejo, el cual lo redirige de nuevo hacia el modulador óptico. El estado de polarización P se transmite a través del divisor de haz hacia una placa retardadora  $\lambda/2$  la cual tiene su eje de transmisión orientado a 45° respecto al vector de polarización de P. La placa  $\lambda/2$  rota 90° el estado de polarización P y la convierte en S. Después de ser transmitida la luz visible por el SCP, ambos vectores de polarización vibran en la misma dirección.

Una lente condensadora que se encuentra al final de este bloque (lámpara - lente condensadora), converge la luz con distribución de intensidad uniforme y polarizada, en el plano de los moduladores, mejorando la eficiencia del sistema de iluminación del bloque óptico.



Figura 35. Sistema convertidor de polarización.<sup>34</sup>

### V.4 Generación de imágenes a color

Los sistemas de proyección basados en paneles de microdisplays modulan la luz generada por una lámpara externa. Dichos sistemas se basan en la teoría de colores aditivos para generar imágenes a colores. Después de que la luz blanca es procesada por el sistema de iluminación, ésta es separada en los componentes espectrales azul, verde y rojo mediante filtros dicroicos en el siguiente bloque: espectral – proyección (ver Figura 26). El sistema de proyección está constituido por: los filtros dicroicos azul, verde y rojo, espejos metálicos, lentes de relevo, polarizadores cruzados, tres moduladores ópticos, un cubo dicroico y la lente de proyección, explicados a continuación.

<sup>34</sup> http://www.3lcd.com/es/ftr\_ps\_2\_s.html#il

#### V.4.1 Filtros dicroicos.

El primer elemento es el filtro dicroico azul (FDA), es un arreglo de películas delgadas diseñado de tal manera que las longitudes de onda correspondientes a la región azul del espectro visible, son reflejadas al incidirle luz blanca a un ángulo de 45°, las componentes espectrales restantes son transmitidas sin ser alteradas. Similarmente, el filtro dicroico verde (FDV) refleja las componentes de la región verde del espectro visible incidente a 45°, y finalmente, un espejo metálico (EM) orientado a 45°, refleja las componentes espectrales restantes de la luz transmitida por el FDV que corresponden a la región roja del espectro visible. En la Figura 36 se presentan las curvas de transmitancia de cada uno de estos filtros (Barocio Montemayor, *et al.* 2006). Los espejos metálicos de primera cara son utilizados para guiar los haces de luz visible dentro del bloque óptico. Las lentes de relevo compensan las diferencias de camino óptico de los tres haces de luz azul, verde y rojo.



Figura 36. Curvas de reflectancia espectral de los filtros dicroicos: a) azul, b) verde y c) rojo utilizados en el bloque óptico.<sup>35</sup>

<sup>35</sup> Barocio Daniel, 2006. "Grand Wega Optical Block Characterization"

#### V.4.2 Microdisplay de cristal líquido

El máximo color de luz blanca alcanzable por un sistema de 3 microdisplays de LCD es el generado continuamente por la lámpara que alimenta al sistema. El negro más negro está determinado por la eficiencia del sistema de modulación para extinguir la luz de la lámpara. Este sistema es formado por un panel de LCD de configuración TN, localizado entre dos polarizadores lineales cruzados. Se tiene un sistema de modulación por cada uno de los canales RGB para generar la escala de grises de cada canal primario.

Un microdisplay de LCD está formado por un arreglo matricial de elementos de imagen (pixeles). Los pixeles en conjunto con los polarizadores cruzados modulan espacialmente la luz que transmiten, para generar la escala de gris de cada canal y generar las 3 imágenes de color primario. Una explicación más profunda acerca del funcionamiento de un panel de configuración 90° TN LCD se provee en el apéndice A de esta tesis.

Una vez formadas las tres imágenes en los colores RGB, éstas son mezcladas aditivamente mediante el cubo dicroico tipo X para formar la imagen final.

#### V.4.3 Generación de la imagen a ser proyectada

El cubo dicroico tipo X formado por cuatro caras laterales, una cara superior y una cara inferior, tiene dos direcciones de operación. Cuando luz blanca incide en la cuarta cara lateral, es descompuesta en tres haces de luz roja, verde y azul, por las películas delgadas depositadas en las diagonales del cubo, que han sido diseñadas para reflejar las regiones azul y roja, y transmitir la región verde del espectro visible. De igual forma pero en

dirección contraria, cuando las tres imágenes de colores RGB inciden cada una en la cara lateral correspondiente, se obtiene la mezcla aditiva de las tres imágenes y se forma una sola imagen de color natural la cual sigue su camino hacia la lente de proyección. En la Figura 37 se observa la mezcla aditiva de las tres imágenes RGB moduladas espacialmente. formadas por la escala de gris de cada color primario. El cubo dicroico tipo X es construido por la combinación de cuatro barras triangulares para crear un sólido rectangular. Se necesita alta precisión para procesar, adherir y alinear las barras para evitar líneas oscuras e imágenes dobles debidas a superficies dicroicas desalineadas (EPSON).





<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> http://www.3lcd.com/es/ftr\_ps\_2\_s.html#dp
<sup>37</sup> http://en.wikipedia.org/wiki/RGB\_color\_model

#### V.4.4 Lentes de proyección

En el diseño del sistema de lentes de proyección, existen consideraciones especiales que el diseñador óptico con experiencia debe considerar. El sistema de proyección es constituido por un complejo conjunto de lentes. Los lentes deben ser corregidos en aberraciones cromáticas, ya que los tres colores primarios son proyectados por el mismo sistema de proyección.

Normalmente, cuando no existe elemento óptico entre el modulador y la lente de proyección, la distancia focal posterior de la lente de proyección no es problema y la distancia puede ser relativamente corta. Sin embargo, en la arquitectura de 3 LCD se tiene el cubo dicroico entre el lente y los moduladores. Lentes de distancia focal posterior relativamente larga son necesarios. El diseño más común es el de un telefoto invertido, un ejemplo de este diseño se muestra en la Figura 38.





<sup>&</sup>lt;sup>38</sup> Stupp Edgard H., Figura 7.51, pag 144

Note que este diseño requiere un elemento óptico relativamente cercano al panel de LCD. La posición de dicho elemento en este diseño se encuentra antes del cubo dicroico. Por consiguiente, dicho elemento debe ser replicado en cada canal. En cualquier lente donde son duplicados elementos ópticos, es necesario asegurar que la amplificación, distorsión, etc. de los tres haces son las mismas y las 3 imágenes converjan.

Para que las imágenes generadas por un sistema de 3 microdisplays converjan, se realiza un ajuste mecánico de dos de los paneles de LCD para alinear las imágenes sobre la pantalla en un punto de referencia (típicamente el centro), con el punto correspondiente del tercer panel. En la práctica, dichos páneles se deben de ajustar en 6 ejes, tres ejes traslacionales (x, y, z) y tres ejes rotacionales ( $\theta$ ,  $\phi \psi$ ). Si las tres trayectorias ópticas tienen la misma amplificación y distorsión, entonces la imagen converge. Si existen diferencias de amplificación o distorsión entre las trayectorias, será imposible lograr una convergencia de la imagen en cualquier parte de la misma (Stupp, 1999).

De la manera descrita previamente, es como una televisión de retroproyección despliega imágenes a colores en la pantalla. El gamut de colores que posee este tipo de televisiones está limitado por la distribución espectral de la lámpara, y por la saturación y el tono de los colores de luz primarios azul, verde y rojo que se obtienen de los filtros dicroicos.

#### V.5 Pantalla de una televisión de retroproyección

Existen dos configuraciones para una pantalla de proyección: pantallas de proyección frontal, y pantallas de proyección trasera o retroproyección. En la configuración de proyección frontal, el observador y el proyector (bloque óptico) se encuentran del mismo lado, la imagen emitida desde el proyector hacia la pantalla, es reflejada hasta los ojos del espectador, ésta es la configuración utilizada en un cine (ver Figura 39 a)). En la configuración de retroproyección, el observador y el proyector se encuentran en lados opuestos separados por la pantalla, donde se proyecta la imagen que es transmitida al espectador (Stupp y Brennesholtz, 1999). Esta última es la configuración utilizada en la televisión de retroproyección SONY Grand Wega (ver Figura 39 b)). En esta configuración, un espejo metálico cumple con tres funciones: invertir la imagen formada en el bloque óptico, reflejarla hacia la pantalla, y permitir que un sistema de proyección óptico esté contenido en un gabinete de televisión de dimensiones reducidas.



Figura 39. Pantallas de proyección: a) frontal y b) retroproyección.

Típicamente la luz emitida desde la lente de proyección en la configuración de retroproyección, posee un ángulo de divergencia alrededor de  $\pm 40^{\circ}$  para minimizar la profundidad del gabinete. Sin la pantalla, un espectador observará solo una muy brillante y pequeña sección de la imagen completa. Para recrear una imagen perceptible, la pantalla debe de redirigir la luz de la imagen uniformemente hacia el espectador. Pantallas de retroproyección comerciales logran esto en 3 pasos. Primero, la luz divergente de la lente de proyección es colimada mediante una lente Fresnel cuya distancia focal es equivalente a la distancia entre la lente de proyección y la pantalla. Segundo, la luz es esparcida uniformemente sobre un área asimétrica donde es posible que se encuentre el espectador a cualquier lado de la posición central de la pantalla. Tercero, la luz es transmitida por un difusor para evitar que el espectador perciba variaciones de intensidad de la imagen. Los últimos dos pasos se llevan a cabo mediante un arreglo de microlentes para el esparcimiento asimétrico, y un difusor convencional (Robinson *et al*, 2005).

Los conceptos de esparcimiento uniforme de la luz sobre un área asimétrica, y la consecuente ganancia de la pantalla debida a la concentración de la luz en dicha área, son explicados a continuación.

#### V.5.1 Ganancia de la pantalla y ángulo medio

La pantalla de retroproyección es un elemento óptico pasivo, es decir, no genera más luz de la proyectada por el bloque óptico. El concepto de ganancia es un número adimensional que describe que tan brillante es la pantalla comparada contra una superficie Lambertiana, y está determinada por la siguiente ecuación:

$$G = \frac{Lv_P}{Lv_L}$$
(25)

Donde G es la ganancia de la pantalla,  $Lv_P$  es el brillo (luminancia) de la pantalla, y  $Lv_L$ es el brillo de una superficie Lambertiana. Por definición, la distribución de iluminación por una superficie Lambertiana es independiente del ángulo de visión, es decir que desde cualquier ángulo que se le observe, su luminancia será la misma. Cuando una superficie Lambertiana es iluminada por detrás con luz colimada, transmitirá el 100% de la luz reemitiéndola uniformemente en un hemisferio de  $2\pi$  estereorradian. Dadas las condiciones ideales de una superficie Lambertiana se le asigna una ganancia de 1.0, esta es la referencia de comparación al medir la luminancia de las pantallas de retroproyección (Reflexite Display Optics, 2000). Sin embargo, una distribución de iluminación que cubra un hemisferio en su totalidad no es lo más eficiente para una pantalla de televisión, donde la luz dirigida hacia el piso y hacia el techo de la habitación se pierde al no llegar hasta los espectadores, quienes típicamente se ubican a  $\pm 45^{\circ}$  del plano horizontal y a  $\pm 10^{\circ}$  del plano vertical de la televisión. Cuando la pantalla de retroproyección es uniformemente iluminada redirige la luz hacia los espectadores concentrandola, y haciendo la imagen más brillante que en una superficie Lambertiana. Bajo estas condiciones la pantalla posee una ganancia típica de G = 5. La redistribución de la luz por la pantalla es descrita por la expresión:

$$\left[ \left[ L(\theta, \phi, x, y) d\Omega dA \le \Phi \right] \right]$$
(26)

Donde L es la distribución de luminancia en el espacio del espectador;  $\theta, \phi$  son los ángulos azimutal y polar; x, y representan la posición en la pantalla. El elemento de ángulo sólido está representado por  $d\Omega$  y el elemento de área por dA. La luminancia o brillo producido por el proyector (bloque óptico) está representado por  $\Phi$ . Se utiliza el símbolo menor que o igual en la configuración de retroproyección pues se toman en consideración la luz reflejada hacia el proyector y la luz absorbida por la pantalla. La ecuación anterior representa claramente el hecho de que la pantalla es un elemento óptico pasivo con una luminancia menor o igual que la luminancia del bloque óptico, además de que la distribución de iluminación de la pantalla tiene una dependencia angular respecto a la normal.

El término *ganancia pico* se asigna al máximo brillo logrado por la pantalla, que típicamente se encuentra sobre la normal, el término *ángulo medio* se refiere al ángulo fuera de eje en el cual el valor del brillo decae un 50%. En el caso de la pantalla de reptroproyección en estudio que posee una distribución de luminancia asimétrica, se tienen dos ángulos medios, un ángulo medio horizontal y un ángulo medio vertical. En la Figura 40 se visualizan un ejemplo de ganancia de una pantalla de retroproyección con ángulo medio horizontal de 60°.

Como puede verse en la Figura 40, la luminancia de la superficie Lambertiana permanece constante para cualquier ángulo. La línea punteada describe el comportamiento ideal de una pantalla con ganancia de 1.5, donde la luminancia permanece constante dentro del intervalo de  $\pm 60^{\circ}$ . La ganancia de una pantalla es mejor representada por la línea sólida donde el brillo máximo se encuentra sobre la normal y disminuye al incrementar el ángulo.



**Figura 40.** Ganancia de la pantalla. La línea segmentada (- -) representa una ganancia de 1.0 de una superficie Lambertiana, la línea punteada (-) representa idealmente a una ganancia de 1.5 y la línea sólida (-) es una representación real de una ganancia de 1.5<sup>39</sup>

El ángulo medio horizontal se encuentra alrededor de  $\pm 60^{\circ}$  en este caso, y para ángulos mayores a  $\pm 75^{\circ}$  el brillo es nulo. La explicación anterior es válida para la pantalla de retroproyección de la televisión SONY, la cual posee ángulos medios de  $\pm 45^{\circ}$  y  $\pm 10^{\circ}$  horizontal y vertical respectivamente.

#### V.5.2 Componentes de la pantalla.

La pantalla de una televisión de retroproyección está formada por dos componentes: una lente Fresnel y una placa lenticular, conocidos en la industria de televisión con los nombres Fresnel y lenticular, respectivamente.

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> Stupp Edward H., 1999. Figura 7.61, pag 154.



Figura 41. Fresnel: a) Sección transversal, b) Vista frontal, y lenticular: c) Secciona transversal, d) Vista frontal.

La lente de Fresnel es una estructura periódica refractiva de prismas concéntricos, que resulta al colapsar la superficie curva de una lente convencional. En la Figura 41 a) se puede apreciar el corte transversal del Fresnel y observar la geometría típica de este tipo de lentes, formados por pendientes y contornos. La pendiente es la superficie utilizada para aproximar la curvatura de la lente convencional, y los contornos son las discontinuidades necesarias entre las pendientes para reducir el grosor de la lente convencional (Davis *et al.,* 2001). La función del Fresnel es mejorar la uniformidad de luminancia de la pantalla, esto lo logra colimando la luz divergente proyectada desde la lente de proyección. La orientación correcta es encarando los prismas del Fresnel hacia el conjugado infinito. Sin la lente Fresnel se tendrían pérdidas significativas de luz, y en la pantalla se percibiría una región muy brillante al centro y oscura en las esquinas como se muestra en la Figura 42.



Figura 42. Uniformidad de la luminancia de una pantalla de retroproyección.<sup>40</sup>

Como se puede apreciar en la gráfica de la figura anterior, la luminancia provista por el Fresnel a lo largo de la pantalla no decae hasta la mitad (~0.45) de su valor máximo (~0.9), esto permite que el espectador perciba una imagen con brillo uniforme en toda la pantalla. Como se mencionó en el capítulo III de esta tesis, lo anterior es posible debido a la pobre respuesta que presenta el sistema visual humano a las variaciones de brillo intenso, y a la respuesta de un sistema a un estímulo de acuerdo con la ley de Weber (Bush, 2000).

Una vez transmitida por el Fresnel, la luz colimada incide en el lenticular como se muestra en la Figura 43. La placa lenticular es un arreglo periódico de columnas verticales de microlentes planos – convexos, cuya función es refractar la luz uniformemente en un solo plano, con un ángulo tal que el haz de rayos de la imagen desplegada en la pantalla alcance a varios espectadores ubicados frente al televisor. Variando la curvatura de las microlentes, la luz incidente puede ser refractada hasta 70° horizontalmente. La pantalla de retroproyección se forma al juntar la lente Fresnel con la placa lenticular.

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> Bush Robert C., 1999. "Rear Projection Screens for Different Applications"



Figura 43. Pantalla de retroproyección, arreglo óptico de una lente Fresnel y una placa lenticular.

#### V.5.3 Discriminación de la luz ambiental

Los reflejos de la luz ambiental sobre la pantalla de una televisión afectan directamente el contraste, y en particular el color de la imagen. Una buena pantalla de televisión de retroproyección, discrimina entre la luz ambiental reflejada y la luz emitida por la televisión mediante el uso de polarizadores o por técnicas de discriminación angular. Sin embargo, las primeras son poco utilizadas debido a la perdida significativa del brillo. La técnica de discriminación angular funciona bajo el principio de que la luz de la imagen incidente en el lenticular, puede ser enfocada en pequeñas aperturas sin pérdidas significativas y después emitidas hasta el espectador. Estas mismas aperturas son utilizadas para absorber cualquier luz ambiental incidente en la pantalla, evitando las reflexiones no deseadas y mejorando el contraste mediante el uso de tiras negras. Lo anterior es posible gracias a que esta estructura es compatible con los microlentes utilizados para esparcir la luz, como se puede ver en la Figura 44.



Figura 44. Placa lenticular.41

#### V.5.4 Ensamble de la pantalla de retroproyección.

El procedimiento de ensamble del Fresnel y el lenticular para formar la pantalla, comienza con la limpieza de las superficies de ambos componentes. Lo anterior para evitar el daño de los elementos ópticos en los componentes debidos a partículas duras, y eliminar los problemas que deterioran la calidad de la pantalla de la televisión entregada al cliente (Barocio Montemayor *et al*, 2006).

El ensamble de la pantalla se lleva a cabo dentro de un cuarto limpio provisto de filtros HEPA, ionizadores de aire y humidificadores. Cada uno de los componentes de la pantalla debe ser primero inspeccionado, y limpiado con los ionizadores de aire antes de proceder con el ensamble. La presencia de alguna partícula sobre la superficie de los componentes potencializa el daño de las mismas. Una vez limpias las superficies, se procede a realizar el ensamble de ambas. Cuidadosamente, sobre la mesa de ensamble se superponen Fresnel y

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> Robinson Michael G., 2005. Figura 2.10 pag 34.

lenticular con las superficies ópticas encontradas, y el lado duro de cada componente expuesto hacia fuera. Ambas componentes se mantienen unidas mediante cinta adhesiva. Posteriormente, los operadores proceden a realizar la inspección visual de la pantalla. Se dispone la pantalla sobre el dispositivo de inspección que posee un bloque óptico para iluminarla correctamente. Son dos las categorías en que se dividen los posibles defectos: defectos de proveedor y los defectos de producción, estos últimos debidos al manejo de los componentes durante el ensamble. Los operadores realizan la inspección de la pantalla de acuerdo al procedimiento de inspección y juzgan siguiendo las especificaciones establecidas para cada defecto. Toda pantalla que posea algún defecto por encima de su especificación es rechazada. Después de este proceso, las pantallas aprobadas se llevan a otra estación donde son ensambladas en una televisión.

## VI Métodos y materiales

En el presente capítulo se describen detalladamente los 4 experimentos propuestos para realizar en las instalaciones de la empresa SONY – Tijuana Este S.A. de C.V., en Baja California México, dentro de los departamentos: Core – Technology, y Manufacture Systems Development (MSD). Donde existe una falta de información concluyente respecto a la dependencia entre cada televisión y su pantalla, y cómo afecta a los ajustes de gamma y uniformidad de color, el cambio de la pantalla de una televisión. Los 2 primeros experimentos propuestos se enfocaron en el análisis de los componentes: bloque óptico – pantalla. Ambos experimentos buscan responder si existe la mencionada dependencia. El conocimiento y la confirmación de dicha información es crítica para la toma de decisiones dentro de la empresa, y darle continuación al potencial proyecto en el que se pretende cambiar la manera de llevar a cabo los ajustes de gamma, uniformidad de color, antes de realizar la integración de la televisión. A continuación se hace la descripción de los procedimientos propuestos por el autor para cada experimento:

- Influencia de las pantallas sobre el ajuste de gamma.
- Influencia de las pantallas sobre el ajuste de uniformidad de color.
- Análisis espectral de la pantalla.
- Distribución espacial de la uniformidad del color de una pantalla de retroproyección.

# VI.1 Influencia de las pantallas sobre el ajuste de Gamma

El primer experimento que se propuso, se realizó dentro de las instalaciones del área de Ingeniería de Equipos del departamento MSD en SONY de Tijuana. Departamento que facilitó el equipo y el software utilizados, mismos que se utilizan para realiza el ajuste de gamma de la manera tradicional:

- 1 Computadora (CPU).
- 1 televisión de retroproyección de 42" de diagonal
- 1 Espectroradiómetro marca Minolta modelo CA 210 "Display Color Analyzer"
- Software de ajuste de gamma desarrollado por el personal de SONY de Tijuana.

En el experimento se analizaron 8 pantallas de una televisión de retroproyección de 42". La metodología que se propuso para obtener la influencia de las pantallas sobre el ajuste de gamma, puede seguirse en el diagrama de flujo ilustrado en la Figura 45 a). Primero se seleccionó una televisión de retroproyección y se le hizo el ajuste tradicional de gamma, que se explica en el siguiente capítulo. Durante el desarrollo del experimento esta televisión será referenciada como la "televisión original". Por consiguiente, la pantalla que posee la televisión original al momento de ser ajustada será referida como la "pantalla original". Después de ajustar en gamma a la televisión original, se obtuvieron los valores de color (x, y) y brillo (Lv) del sistema original: bloque óptico – espejo – pantalla. Estos parámetros fueron la referencia para las mediciones de color y brillo realizadas a las 7

pantallas restantes. A continuación se desarmó la televisión para hacer el cambio de la pantalla. Los parámetros de color y brillo fueron medidos al centro de la pantalla usando la Minolta CA 210, la secuencia es ilustrada en la Figura 45 b). Para hacer las mediciones, la probeta de medición debe ser asegurada en la posición de medición (centro de la pantalla) y separada de la pantalla una distancia no mayor a 30 mm., para asegurar esta distancia se utiliza la capucha de la probeta, la cual auxilia a la perpendicularidad entre la probeta y la pantalla, así como también evita filtraciones de luz ambiental. Es una recomendación que el área medida abarque al menos 500 pixeles, lo cual se cumple por las dimensiones mismas de la probeta que posee un diámetro de 27 mm., y un ángulo de apertura de  $\pm 2.5^{\circ}$ . Las mediciones se realizaron dentro de la temperatura de operación ( $35^{\circ}C - 45^{\circ}C$ ) de la televisión, en el modo de video componente y apertura de iris en nivel 6.



Figura 45. Experimento 1: ajuste de gamma, a) diagrama de flujo del procedimiento para la medición de los parámetros de color y brillo, b) medición del cambio en el ajuste de gamma al centro de la pantalla.

81

# VI.2 Influencia de las pantallas sobre el ajuste de Uniformidad de Color

Este segundo experimento se realizó siguiendo el procedimiento del experimento 1 descrito en el inciso (a) de la figura anterior. Los valores de color de la pantalla original medidos durante el desarrollo del experimento 2, vuelven a ser la referencia de comparación. El equipo utilizado fue facilitado nuevamente por el área de Ingeniería de Equipos y es el siguiente:

- 1 Computadora (CPU).
- 1 televisión de retroproyección de 42" de diagonal.
- 1 Espectroradiómetro marca Minolta modelo CA 210 "Display Color Analyzer"
- Software de medición de uniformidad de color desarrollado por el personal de SONY de Tijuana.

Cabe señalar que durante el procedimiento la televisión original solamente se ajustó en gamma y no así en uniformidad de color. Se tomaron las mediciones del color (x, y), en 9 zonas de las 8 pantallas, incluyendo el centro como se muestra en la Figura 46. Se comparó las diferencias de color de cada zonas (P1 – P9) entre las 8 pantallas en JND.



Figura 46. Experimento 2: ajuste de uniformidad de color.

De los dos primeros experimentos se obtuvo información relevante de color, brillo y diferencia de color apenas perceptible (JND) de cada una de las pantallas, mediante las fórmulas de los valores triestímulos XYZ repasadas en el capítulo IV. En este análisis se introdujo una variación a cada uno de los triestímulos ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) de manera independiente, afectando directamente a las coordenadas cromáticas de la luz transmitida por la pantalla. Como resultado del análisis numérico, se obtuvo una estimación de la variación necesaria de cada uno de los valores triestímulos para obtener una variación del color (x, y) correspondiente a 1 JND y a 2 JND. Se sugirió que la variación de la cromaticidad de cada pantalla se debe a la interacción entre la luz y la pantalla, la cual puede ser: absorción, transmisión, reflexión y esparcimiento de la luz. Dado el análisis anterior, se propuso caracterizar espectralmente la pantalla de la televisión, y saber si existen bandas de absorción en la pantalla para el rojo, verde o azul.

A continuación se describe el procedimiento y equipo utilizado para el análisis espectral de la pantalla.

#### VI.3 Análisis espectral de la pantalla

Para hacer el análisis espectral de la pantalla se utilizó equipo proporcionado por el laboratorio de óptica del departamento Core Technology:

- Espectrofotómetro marca Edmund Modelo M57 052. Sensible en el rango (390 nm – 760 nm). Detector CCD arreglo vectorial fijo de 2048 pixeles.
- Fibra óptica con diámetro de 600 μm.
- Mascarilla.
- 1 televisión de retroproyección de 50" de diagonal.

Se siguió el procedimiento utilizado para obtener la curva de transmitancia espectral absoluta de un elemento óptico. Con el espectrofotómetro y la fibra óptica, se tomaron las mediciones de oscuridad y de la fuente de referencia, considerando la fuente de referencia como la luz proyectada desde el bloque óptico integrado en la televisión, sin la pantalla (Figura 47 a)). Con la ayuda de una mascarilla se realizó el muestreo a lo largo de la pantalla, para que coincidieran en el mismo punto las mediciones de intensidad de la fuente de referencia, y las mediciones de transmitancia de la pantalla como se muestra en la Figura 47 a) y b).



Figura 47. Análisis de transmitancia espectral de la pantalla de una televisión de retroproyección. Cada región identificada por la mascarilla es una región de muestreo: a) medición de la fuente de referencia de cada región, b) medición de transmitancia espectral a lo largo de la pantalla.

Los resultados y las explicaciones de las causas que impidieron realizar la caracterización de la pantalla por éste método, son explicados en el capítulo de resultados. Para concluir el presente capítulo, se describe el método y el arreglo óptico experimental diseñado para llevar a cabo el experimento principal de esta tesis, en el cual se evaluó la uniformidad cromática de la pantalla utilizada en una televisión de retroproyección.

# VI.4 Distribución espacial de la Uniformidad del color en una pantalla de retroproyección

Como se mencionó en el Capítulo V, la pantalla de una televisión de retroproyección está constituida por una lente de Fresnel y una placa lenticular/difusor. El objetivo del

experimento final, es estudiar la uniformidad del color de la luz transmitida a lo largo de toda la pantalla, y de sus componentes de manera independiente. Como parámetro de referencia se utilizó el valor límite de 2JND, que es el valor típico utilizado para ajustar la uniformidad de color de una televisión. El equipo utilizado fue proporcionado por el laboratorio de óptica del departamento Core Technology:

- 1 Computadora (CPU).
- 1 Espectroradiómetro marca Minolta modelo CA 210 "Display Color Analyzer"
- 1 pantalla de retroproyección de 50" de diagonal.
- 1 bloque óptico sin lente de proyección de una televisión SONY Grand Wega de 50" de diagonal.
- 1 mascarilla.

Para tomar las mediciones de color transmitido independientemente por cada una de las componentes (Fresnel y lenticular), y por el ensamble de éstas (pantalla), se cortó la pantalla en 28 secciones (7x4) de aproximadamente 6"x6" como lo muestra la Figura 48 a). Mediante las formulas del Espacio de Color CIE u'v'Lv, y diferencia de color  $\Delta u'v'$ estudiados en el capítulo IV, se graficó la distribución espacial del cambio de color inducido por el Fresnel, el lenticular y la pantalla.



Figura 48. a) Fresnel y lenticular cortados en 28 secciones de 6"x6", b) Arreglo óptico y metodología del experimento 4.

La secuencia y el arreglo óptico propuestos se ilustran en la Figura 48 b). Se utilizó el bloque óptico (sin la lente de proyección) como fuente de luz. La lente de proyección fue removida para evitar la amplificación del haz de luz emitido por el bloque óptico. El arreglo óptico se montó sobre una mesa y todos los elementos se encuentran alineados en un solo eje, en primer lugar el bloque óptico; enseguida, unido a la salida de la luz del bloque óptico, se colocó la sección del componente a ser evaluado, y en última instancia, el colorímetro unido al componente. Al unir el colorímetro a la componente medida, la mayor cantidad de luz transmitida por ésta se colecta uniformemente por la probeta de prueba, sin embargo en el caso particular de la lente de Fresnel, el ángulo de la luz transmitida está en función del ángulo de incidencia de la luz proyectada desde el bloque óptico en su posición

original en la televisión. Por lo anterior se entiende que al cortar el Fresnel en secciones pequeñas, y posicionarlo pegado a la salida de luz del bloque óptico. la luz transmitida por la lente de Fresnel incide en la probeta de prueba con un ángulo diferente para cada sección analizada. La secuencia de la toma de lecturas del color de las 28 secciones de cada componente fue la siguiente (ver Figura 48 b)): primero se tomaron 5 lecturas del color de referencia del bloque óptico (u'o, v'o), en seguida se hicieron 5 mediciones del color de la luz transmitida por el Fresnel  $(u'_f, v'_f)$ , después se tomaron 5 mediciones del color transmitido por el lenticular  $(u'_l, v'_l)$ . Finalmente se hicieron las mediciones de color de la luz transmitida por el ensamble de una sección de la lente de Fresnel con la correspondiente sección de la placa lenticular (u's, v's). Cada una de las 28 secciones de cada componente es identificada de acuerdo a su posición en la pantalla. Con la ayuda de una mascarilla (Figura 49) se tomaron las 5 lecturas de cada sección, de esta manera se asegura que el área medida en la lente de Fresnel corresponda con el área medida en la placa lenticular. Las dimensiones de la mascarilla son proporcionales a las secciones (6"x6"), con 5 áreas de medición de 1/2" x 1/2" con un espaciamiento de 1" entre sí.



Figura 49. Mascarilla de medición

## VII Resultados y Discusión

Para poder utilizar un microdisplay basado en cristal líquido como un dispositivo formador de imágenes, es necesario cambiar la respuesta no lineal del modulador a la entrada de una señal de voltaje (apéndice A Figura 75), por la función inversa de la respuesta del sistema visual humano al brillo (Figura 12), y lograr que las imágenes generadas por los microdisplays sean de transición suave y perceptualmente uniformes, lo cual es alcanzado con el procedimiento de ajuste de gamma explicado a continuación.

#### VII.1 Ajuste de gamma

El ajuste de gamma se lleva a cabo mediante una comunicación entre el equipo de ajuste y la televisión integrada, como se muestra en la Figura 50, dentro de un cuarto oscuro. En cada estación de ajuste se utiliza el equipo apropiado para realizar cada ajuste, como puede ser: computadora, colorímetro o cámara de 3 CCD.



Figura 50. Equipo de ajuste: Computadora, colorímetro Minolta CA210 y televisión.

Una vez establecida la comunicación entre el equipo de ajuste y la televisión en la estación de ajuste de gamma, el generador interno de la televisión manipula los moduladores de luz de cada canal (R, G, B) para generar el color de luz blanca que es proyectado en la pantalla de la televisión. Como se muestra en la Figura 50, el equipo de ajuste (PC y colorímetro) mide el brillo máximo del color blanco proyectado al centro de la pantalla, y calcula el brillo máximo de los 3 moduladores independientemente. De igual forma se calcula el valor de brillo mínimo de cada canal, medido de una imagen negra provectada en la pantalla. Los valores de brillo máximo y mínimo de cada canal determinan el rango de valores de los registros digitales utilizados para el control de los microdisplays. En la Figura 51 se muestra la señal de video digitalizada que controla a cada modulador, así como la respuesta natural de los 3 microdisplays al aplicarles dicha señal (Sandoval, 2007). Debido a que los niveles de brillo percibido son diferentes para cada canal (rojo, verde y azul), es necesario conocer la curva de respuesta particular de cada microdisplay. Durante el ajuste, el generador interno de la televisión (módulo TST) genera 33 niveles de brillo del color blanco (x, y), independientemente de las compensaciones de color de los dispositivos de procesamiento de video. El equipo de ajuste mide estos 33 niveles e interpola 512 valores para generar la curva de respuesta natural de cada modulador como se muestra en la Figura 51. b).



Figura 51. a) Señal de video digital, b) respuesta natural de los 3 moduladores.

El ajuste de gamma es realizado mediante tablas LUT (look up tables) una por canal. Cada tabla se compone de 512 valores de compensación, dichos valores son calculados por medio de las 33 mediciones de brillo, y los valores de color y de brillo establecidos por los diseñadores de la televisión. Dichas especificaciones pueden observarse en la Figura 52 y son las siguientes:

- Coordenadas de color (x=0.2500, y=0.2550) para el nivel TST0, y coordenadas (x=0.2660, y=0.2770) para los niveles de brillo (TST4 – TST32).
- El brillo es descrito por una función de potencia, elevado a la 2.4.

Los valores de compensación almacenados en las tablas LUT son accesados mediante la señal de video digital de cada canal. Los valores en cada tabla atenúan o amplifican la señal para obtener el valor de compensación correspondiente a la señal de entrada y generar la curva inversa de respuesta al brillo del sistema visual humano.



Figura 52. Especificaciones para ajuste de color y brillo.

Los valores de compensación de cada tabla LUT se muestran en la Figura 53 a). La convolución entre la respuesta no lineal de cada modulador y los valores de compensación de cada tabla LUT genera la curva de brillo deseada para cada modulador (ver Figura 53 b)). El ajuste de gamma se completa una vez que los valores de compensación son grabados en la memoria no volátil de la televisión, para que los moduladores operen siempre bajo las condiciones de ajuste.



Figura 53. a) Tablas LUT, valores de compensación de los tres moduladores. b) Curvas de brillo de los tres moduladores ajustadas para una  $\gamma = 2.4$
# VII.2 Resultados del análisis de la influencia de las pantallas sobre el ajuste de gamma

Las características de color, brillo y diferencia de color en JND de la televisión original se presentan en la Figura 54, Figura 55, y Figura 56, mismas que son explicadas a continuación.



Figura 54. Crominancia de la televisión original. 33 niveles de brillo del color blanco del generador interno de la televisión (abscisas) contra coordenadas de color (x, y) del diagrama cromático CIE xyLv (ordenadas).

Las mediciones de color de la televisión original para los 33 niveles de brillo son presentadas en la Figura 54. Los niveles de brillo de interés de esta tesis son los niveles del TST 4 – TST 32. En la gráfica se tiene la coordenada de color fijada por diseño ( $\blacktriangle$ ) (x=0.266, y=0.277), a las cuales deben de aproximarse las coordenadas de color (x, y) de los niveles de brillo de interés. Las coordenadas de color de una televisión ajustada no deben de sobresalir de las tolerancias ( $\blacklozenge$ ) que se muestran. En el caso de los niveles TST5

- TST7 los valores de la coordenada cromática 'y' no pudieron ser ajustados dentro de la tolerancia.



Figura 55. Curva de brillo ajustada de la televisión original. En la figura se muestran las dos curvas de brillo, la ajustada y la de diseño (Lv tg).

La curva de brillo de la televisión original ajustada en gamma se muestra en la Figura 55. La corrección a la respuesta de los microdisplays a la señal digital de control para generar las imágenes, le permite a los microdisplays recrear los diferentes niveles de brillo de la escala de gris de cada canal rojo, verde y azul.

En la Figura 56 se muestra la diferencia entre las coordenadas de color de los niveles de brillo (TST 4 - TST 32) y la coordenada de color establecida por diseño, sobre el diagrama cromático CIE *xy*Lv. Las elipses de MacAdam en la figura, representan las tolerancias de 1JND a 5JND. Se observa que las coordenadas cromáticas de la pantalla original para estos niveles de brillo, se encuentran dentro de la primera elipse de MacAdam (1JND), lo que implica que un espectador no distinguirá la variación del color al cambiar el nivel de brillo de la televisión, utilizando la pantalla original con la cual fue ajustada en gamma la televisión.



**Figura 56. a)** Coordenada cromática de diseño (x=0.266, y=0.277) y elipse de MacAdam de 1 JND, b) Coordenadas cromáticas de los niveles de brillo TST 4 – TST 32 de la televisión original y 5 elipses de MacAdam correspondientes de 1 JND a 5 JND sobre el diagrama CIE xyLv.

Los resultados de las mediciones de color de las 7 pantallas restantes se muestran a continuación en cada una de las gráficas de la Tabla I, en las cuales al igual que la Figura 54, se tienen los valores de coordenadas cromáticas establecidas por diseño, también los valores de tolerancias, y las coordenadas cromáticas de los 33 niveles de brillo TST de la pantalla original. En cada gráfica se comparan las coordenadas de color de los niveles de brillo de cada pantalla, contra las coordenadas de la pantalla original. Al observar individualmente cada una de las gráficas, es evidente que existe un cambio en la cromaticidad. Se observa que éste cambio no es igual en todos los casos.

Estos resultados sugieren que existe una relación entre los componentes del sistema: bloque óptico – espejo – pantalla. Ya que en el experimento la única variable del sistema es la pantalla, los resultados revelan que cada pantalla posee un comportamiento diferente, es decir, cada pantalla altera la crominancia de la luz proyectada desde el bloque óptico de una manera particular.



**Tabla I.** Comparación entre las coordenadas cromáticas de los 33 niveles de brillo al centro de la pantalla original, y las coordenadas cromáticas al centro de las pantallas utilizadas en el experimento 1.





Sin embargo estos resultados no revelan la magnitud del cambio cromático. Para resolver lo anterior se calcularon las distancias entre la coordenada cromática de diseño, y las coordenadas cromáticas de los niveles de brillo de interés, sobre el diagrama cromático CIE xyLv.

Estos resultados de diferencia de color son presentados en la Tabla II, calculados mediante el algoritmo de ajuste (confidencial) desarrollado por el personal de SONY, el cual se basa en la formula de diferencia de color apenas perceptible (JND) presentada en el capítulo IV, ecuación (21). Donde se sustituyeron la coordenada cromáticas de diseño ( $x_0=0.266$ ,  $y_0=0.277$ ) y las coordenadas cromáticas correspondientes de cada pantalla para los niveles TST 4 – TST 32. Es claro pues que al hacerlo así, la comparación del cambio cromático es entre la coordenada de diseño y las últimas. En este momento es necesario recordar que las coordenadas cromáticas de los niveles de brillo (TST4 – TST32) de la pantalla original, poseen una diferencia cromática menor que 1JND al ser comparadas contra la coordenada de diseño.

Como se observa en la Tabla II, la distribución de las coordenadas de color de los niveles de brillo de interés sobre el diagrama cromático, es distinta para cada pantalla. Particularmente en las pantallas 3, 5, 6 y 7 los resultados muestran que la diferencia de color entre la coordenada de diseño y las coordenadas de varios de los niveles (TST 4 – TST 32) es mayor que 2JND saliendo de tolerancia. Indicando que la diferencia de color entre los diferentes niveles de brillo de una misma pantalla, será perceptible para un espectador.

Resulta evidente ahora que al realizar el ajuste de gamma a una televisión ensamblada, se crea una dependencia del sistema: bloque óptico – espejo – pantalla, y sabemos la magnitud de ésta dependencia para una muestra pequeña de pantallas.



**Tabla II.** Distribución de las coordenadas cromáticas de los niveles de brillo (TST 4 – TST 32) y elipses de MacAdam sobre el diagrama cromático CIE xyLv, de cada una de las pantallas utilizadas en el experimento 1.

De la muestra de pantallas analizadas se calculó su media y su desviación estándar, para calcular a partir de estos datos su distribución normal y multiplicarla por un factor de 1 millón, para obtener el comportamiento estimado de las televisiones, y darnos una idea de cómo impactará a la producción masiva. Debido a que la pantalla utilizada en el potencial ajuste de gamma a nivel de bloque óptico, no será la pantalla que se ensamble en la televisión final para su venta al público. Los resultados del escalamiento se listan en la Tabla III.

En el extremo derecho de la Tabla III se listan los resultados del escalamiento a 1 millón de unidades para un cambio de color de 1JND y 2JND. Estos resultados revelan que luego de que se haya realizado el potencial ajuste de gamma a nivel de bloque óptico, y el posterior ensamble del bloque en la televisión, se presentará un cambio en la crominancia de la luz proyectada. En la columna de 1JND los 33 niveles de brillo presentarán cambio, sin embargo dicho cambio no será percibido por los espectadores. En el caso de la columna de 2JND, que es la tolerancia límite para la variación del color de una televisión, resaltan los problemas en los niveles TST4 – TST9, los cuales individualmente presentan un cambio de crominancia mayor que 2JND en las cantidades mostradas en la Tabla III. Lo anterior representaría un grave problema, pues significa que por cada uno de dichos niveles, esas televisiones serían rechazadas de la línea de ensamble, durante la etapa de control de calidad, por no aprobar la evaluación de calidad al estar fuera de las especificaciones.

ND		0.00	12.88	87.12	799.20	373.64	159.70	17.22	300.86	573.39	381.24	3,12	0.01	0.00	00.00	0.00	0.00	00.0		3.	1	•	ı		1	,	,		1	1	1		ä	0.00
2.1		44	89	82 78.5	.04 469,	99 478.0	40 357,4	23 248.	.08 06.	30 18.0	11	61	24	35	04	51	12	34	61	20 DZ	92	60	.46	90	.83	24	.24	38	.45	99	.69	32	54	13
UNL I		63,423	266,622	793,093	929,445	929,187	913,450	909,210	863,710	822,257	694,476	536,680	289,929	170,309	93,835	36,394	13,895	690'9	1,429	1,443	161	103	27	30	67	9	8	16	13	20	40	117	562	2,248
Stdev		0.228	0.279	0.448	0.646	0.657	0.579	0.496	0.400	0.333	0.258	0.217	0.196	0.197	0.184	0.186	0.189	0 185	0.181	0.181	0.168	0.164	0.167	0.172	0.188	0.172	0.172	0.179	0.171	0.174	0.171	0.172	0.181	0.194
Promedio 3	QNL	0.65	0.83	137	1.95	197	1.79	1 66	1.44	131	1.13	1 02	0.89	0.81	0.76	0.67	0.58	0.54	0.46	0.46	0.40	0.39	0.33	0.31	0.28	0.27	0.26	0.26	0.28	0.29	0.33	0.37	0.41	0.45
talla 7	ND	0.60	0.69	130	2.16	2.26	2.05	1.88	1.68	1.50	1.29	1.09	0.94	0.85	0.78	0.65	0.54	0.49	0.35	0.33	0.25	0.19	0.11	0.08	0.01	0.06	0.14	0.18	0.25	0.30	0.38	0.44	0.52	0.57
ntalla 6 Pan	r anr	0.50	0.67	1.45	2.11	2.18	2.01	1.88	1.63	1.48	1.31	122	1.11	1 02	0.93	0.85	0.75	0.67	0.57	0.57	0.48	0.45	0.34	0.34	0.27	0.20	0.15	0.12	0.14	0.17	0.23	0.31	0.38	0.44
intalla 5 Par	ONI	0.98	1.22	.1.36	2.52	2.60	2.36	2.15	1.85	1.66	1.42	123	1.06	1.01	0.88	0.79	0.68	0.60	0.49	0.48	0.42	0.40	0.29	0.26	0.18	0.16	0.10	0.06	0.11	0.11	0.18	0.22	- 0.28	0.34
antalla 4 Pa	<b>UNL</b>	0.54	0.75	1.37	2.02	1.90	1.70	1.50	1.22	113	0.89	0.74	0.56	0.45	0.37	-0.28	0.19	0.16	0.11	0.15	0.15	0.21	0.25	0.24	0.34	0.34	0.38	0.44	0.47	0.49	0.54	0.58	0.63	0.65
antalla 3 P:	UND	0.98	1.21	61 T	2.39	2.33	2.10	1.93	1.61	1.46	1.25	1.14	0.99	0.84	0.83	0.73	09.0	0.58	0.51	0.46	0.41	0.40	0.33	0.28	0.25	0.21	0.18	0.14	0.12	0.07	0.07	0.09	0.11	0.12
intalla 2 P:	<b>UND</b>	0.53	0.76	1.31	1.90	1.90	1.73	1.66	1.43	1.27	1.05	1.02	0.87	0.83	0.77	0.64	0.59	0.51	0.54	0.51	0.42	0.41	0.32	- 0.34	0.29	0.29	0.28	0.31	0.35	0.38	0.43	0.51	0.58	0.66
antalla 1 Pa	ONL	0.44	0.48	0.49	0.57	0.58	0.58	0.64	0.65	0.66	0.71	0.70	0.71	0.69	0.75	0.73	0.74	0.73	0.66	0.72	0.68	0.68	0.66	0.65	0.63	0.60	0.58	0.54	0.53	0.49	0.45	0.43	0.39	0.36
nada P	У	0.2565	0.2609	0.2671	0.2739	0.2777	0.2797	0.2795	0.2806	0.2787	0.2768	0.2774	0.2754	0.2776	0.2756	0.2760	0.2761	0.2760	0.2749	0.2765	0.2749	0.2763	0.2761	0.2757	0.2764	0.2757	0.2748	0.2767	0.2757	0.2758	0.2775	0.2754	0.2761	0.2751
Coorde	x	0,2506	0.2545	0.2589	0.2638	0.2665	0.2674	0.2670	0.2671	0.2661	0.2663	0,2663	0.2648	0.2668	0.2656	0.2654	0.2667	0.2661	0.2652	0.2661	0.2651	0.2650.	0.2654	0.2649	0.2650	0.2652	0.2657	0.2654	0.2646	0.2649	0.2658	0.2653	0.2660	0.2653
Pantalla	original	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7	Nivel 8	Nivel 9	Nivel 10	Nivel 11	Nivel 12	Nivel 13	Nivel 14	Nivel 15	Nivel 16	Nivel 17	Nivel 18	Nivel 19	Nivel 20	Nivel 21	Nivel 22	Nivel 23	Nivel 24	Nivel 25	Nivel 26	Nivel 27	Nivel 28	Nivel 29	Nivel 30	Nivel 31	Nivel 32

 Tabla III. Diferencia de color en JND de los 33 niveles de brillo entre la pantalla original y las pantallas utilizadas en el experimento 1.

En la Tabla IV se muestran gráficamente los resultados estadísticos de los 6 niveles de brillo críticos expuestos en la columna 2JND de la Tabla III. En cada gráfica se muestra la tolerancia máxima de 2JND, el promedio y la desviación estándar de los 6 niveles escalados a 1 millón. También se muestra la estimación de cuantas televisiones serían rechazadas debido al cambio cromático de cada nivel (D. P. M; defectos por millón).

**Tabla IV.** Resultados estadísticos de los niveles de brillo TST 4 – TST 9 de las pantallas analizadas en el experimento 1.



#### VII.3 Ajuste de Uniformidad de color

Debido a que la intensidad de la luz de la lámpara que alimenta al bloque óptico es máxima y uniforme sobre el eje óptico del sistema, durante el ajuste de gamma solamente se corrige la respuesta no lineal del microdisplay a una señal de voltaje, en la región central de cada microdisplay. Una vez ajustado en gamma, la región central del microdisplay es capaz de recrear la escala de gris modulando la intensidad de la luz transmitida por cada canal (R, G, B). En la siguiente estación de ajuste, las lecturas de crominancia:  $(x_R, y_R)$ ,  $(x_G, y_G)$  y  $(x_B, y_B)$  de la región central de cada microdisplay, son utilizadas como referencia para realizar el ajuste de uniformidad de color correspondiente a cada microdisplay en su totalidad. Es necesario realizar éste ajuste para compensar las variaciones de volumen del cristal líquido dentro de cada microdisplay, pues dichas variaciones provocan cambios de crominancia de la luz proyectada en la pantalla de la televisión.

En la estación de ajuste de uniformidad de color, se tiene una cámara de video de 3 CCD para capturar la imagen blanca desplegada en la pantalla de la televisión. La cámara separa la imagen blanca en sus tres colores primarios R, G, y B mediante un cubo dicroico. La función de la cámara es recibir las 3 imágenes e interpretarlas como señales electrónicas de video mediante los dispositivos de carga acoplada (CCD, por sus siglas en inglés). Una vez que las imágenes han sido adquiridas y digitalizadas por la cámara, cada una es seccionada en 322 áreas o zonas de influencia. Mediante algoritmos, la computadora del equipo de ajuste localiza el centro de las 3 imágenes y extrae los valores de intensidad medidos por el CCD rojo, verde y azul correspondiente. Se distingue el mismo número de zonas de influencia en cada imagen, siendo la zona central ajustada en gamma la referencia de ajuste para el resto de la imagen. El equipo de ajuste realiza un barrido completo de todas las zonas de influencia de la imagen y obtiene los valores de intensidad R, G y B en cada zona. A continuación, la intensidad de cada zona es comparada contra los valores de intensidad de la zona de influencia central. La cámara de 3 CCD retroalimenta la información generada de la imagen blanca proyectada en la pantalla de la televisión, directamente a los controladores del bloque óptico. Esta acción se lleva a cabo en tiempo

real, para realizar el ajuste de uniformidad de color directamente sobre los pixeles de los microdisplays (bloque óptico) contenidos en cada zona de influencia detectada por la cámara. El ajuste se lleva a cabo por medio de amplificadores (offset a la señal de control) que alteran la intensidad de la luz transmitida en cada región del microdisplay, hasta lograr igualar el color de dicha zona de influencia con el color de la zona central. Este proceso se repite hasta completar el ajuste de todo el modulador (Martínez, 2007). Los valores generados por el ajuste de gamma y uniformidad son almacenados en la memoria no volátil de la televisión. Estos valores son utilizados durante la operación de la televisión para el despliegue de imágenes brillantes y colores uniformes en pantalla.

# VII.4 Resultados del análisis de la influencia de las pantallas sobre el ajuste de uniformidad de color

Como se mencionó en el capítulo V, el corrimiento del color de la luz transmitida por cada pantalla, se obtuvo midiendo con el colorímetro, el color de las 9 zonas de influencia identificadas en la Figura 46, sobre cada una de las pantallas.

A pesar de que la televisión original no fue ajustada en uniformidad de color, y el lado izquierdo de la misma se percibió más azul que el resto, los valores de diferencia de color apenas perceptible de las 9 zonas de influencia de la pantalla original, permanecen cercanos a los 2 JND al ser comparados contra la coordenada de diseño, como se muestra en la Figura 57.



Figura 57. a) Cromaticidad de las 9 zonas de influencia medidas en la pantalla original, y diferencia de color en JND de las zonas (P1 – P9) comparadas contra (x = 0.266, y = 0.277), b) coordenadas cromáticas de las 9 zonas de influencia sobre el diagrama de color CIE xyLv.

En la Tabla VI se presenta el color de la luz transmitida por cada zona de influencia de las 8 pantallas de acuerdo con la Figura 46. Se muestran 9 gráficas, una por cada zona de influencia, y en cada gráfica, las coordenadas cromáticas (x, y) de las 8 pantallas correspondientes a dicha zona de influencia. Se observó primero que en la zona de influencia central (P1), la dispersión de las coordenadas cromáticas de las 8 pantallas es menor que 1 JND, resultado coherente con el experimento anterior debido a que la zona P1 permanece con el ajuste de gamma, y el nivel de brillo utilizado durante la evaluación del experimento 2 es mayor al nivel TST 22. Es de notarse que en el resto de las zonas de influencia (P2 – P9) la dispersión de las coordenadas cromáticas es mayor, siendo las zonas P2, P8 y P9 correspondientes al lado izquierdo de la televisión, las zonas con las diferencias de color mayores. Se puede apreciar en la Tabla VI, que para una misma zona de influencia, el color de la luz transmitida presenta un fuerte cambio, de una pantalla a otra.

106

En la Tabla VTabla se presentan los valores en JND de las diferencias de color de las 8 pantallas para las diferentes zonas de influencia, representadas gráficamente en la Tabla VI.

Tabla V. Diferencia de color de las 9 zonas de influencia de las 8 pantallas, por columnas se presenta en JND elcorrimiento del color de cada zona de influencia (P1 - P9) comparada contra la coordenada de diseño.

Zona de influencia	P1	P2	P3	P4	P5	P6	<b>P</b> 7	P8	P9
Pantalla original	0.13	2.30	0.19	2.38	1.32	1.94	0.62	1.70	0.84
Pantalla 1	0.47	3.49	0.67	2.63	1.38	0.58	0.99	2.16	1.88
Pantalla 2	0.39	3.00	0.98	2.25	1.05	1.05	0.98	2.55	1.87
Pantalla 3	0.51	3.57	1.29	2.63	0.85	1.08	1.56	3.42	3.26
Pantalla 4	0.45	2.55	1.36	2.77	1.07	1.51	2.23	3.66	3.13
Pantalla 5	0.36	2.92	0.86	2.93	1.02	2.17	2.19	3.58	3.18
Pantalla 6	0.20	2.24	1.12	2,90	0.87	1.06	1.67	3.52	3.03
Pantalla 7	0.53	3,68	0.66	2.63	1.66	3.06	1.46	3.35	2.49

Los resultados indican que el cambio de pantallas afecta fuertemente el color de la luz transmitida, esto lo podemos observar al comparar el cambio de color de una misma zona de influencia entre las 8 pantallas en la Tabla V. Donde se muestra también que la magnitud del cambio de color para las 9 zonas de influencia de una misma pantalla no es igual.

A continuación se presenta una manipulación numérica a los valores triestímulos de la crominancia de la luz transmitida por la pantalla original, para el nivel TST 15. En dicha manipulación se busca establecer un valor aproximado de la variación de intensidad radiada por las distintas fuentes (R, G, B) del bloque óptico equivalente a 1 y 2 JND.



Tabla VI. Resultados del experimento 2. En cada gráfica se presentan las coordenadas cromáticas de cada zona de influencia de las 8 pantallas evaluadas sobre el diagrama cromático CIE xyLv.

#### VII.4.1 Manipulación numérica de los valores triestímulos

De acuerdo con la teoría del modelo de color CIE XYZ, las coordenadas cromáticas (*x*, *y*, *z*) del espacio de color CIE *xy*Lv, son calculadas a partir de los valores triestímulos (X, Y, Z) de acuerdo con las ecuaciones:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$
 (27)

Este modelo de color asigna una terna de números específica para cada color que un Observador Promedio puede percibir, y son representados en el diagrama cromático (Figura 21). En el espacio de color CIE *xy*Lv, los valores triestímulos pueden ser calculados a partir de las coordenadas cromáticas como se muestra a continuación:

$$X = \frac{Y}{y}x, \qquad Y = Lv, \qquad Z = \frac{Y}{y}(1 - x - y)$$
 (28)

Como se explicó en la capítulo IV, y se muestra en la Figura 19, una variación en la intensidad radiada de las fuentes de igualamiento de color  $(\overline{x}, \overline{y}, \overline{z})$  afecta directamente a los valores triestímulos (X, Y, Z) de acuerdo con (17), y en consecuencia afecta la crominancia de la luz resultante de la superposición de las tres fuentes primarias R, G y B. El procedimiento que se propuso para la manipulación numérica toma en consideración lo anterior, y es la razón por la cual se prosiguió como se menciona a continuación:

Se utilizaron los valores de cromaticidad y brillo del nivel TST 15 de la pantalla original, obtenidos durante el experimento 1. Correspondiéndole las coordenadas (x=0.2667, y=0.2761) y luminancia de (Lv=103.7 cd/m<sup>2</sup>). Se sustituyen dichos valores en (28), y se obtienen los valores triestímulos

(X<sub>15</sub>,=100.200, Y<sub>15</sub>=103.723, Z<sub>15</sub>=171.793) correspondientes al color de luz emitido por el bloque óptico para el nivel TST 15, y transmitido por la pantalla original con la televisión ajustada en gamma.

• De acuerdo con el manual de operación de la Minolta, el valor triestímulo X es calculado por el colorímetro mediante la ecuación:

$$X = 0.16727Z + X2 \tag{29}$$

donde X2 es un valor constante igual a 71.46439.

Partiendo de los valores (X<sub>15</sub>, Y<sub>15</sub>, Z<sub>15</sub>), se varió el valor de X<sub>15</sub> en incrementos de ±0.5% de su valor, en un intervalo de [-5%, 5%] como se muestra en la Figura 58 a).



Figura 58. Resultados de la manipulación numérica al valor triestímulo X del nivel TST 15: a) valores cromáticos y diferencia de color, b) gráfica de la diferencia de color entre las variaciones.

Con el nuevo valor X'<sub>15</sub>, se sustituyen los valores triestímulos en (27) para obtener las nuevas coordenadas cromáticas (x', y') resultantes (Figura 58 b)).

Es así como se obtuvo el valor estimado de 1 y 2 JND relativo a los triestímulos (X<sub>15</sub>, Y<sub>15</sub>, Z<sub>15</sub>). En el caso del triestímulo X que corresponde al color rojo, al existir una variación de aproximadamente  $\pm 1.5\%$  de la intensidad radiada por la fuente roja se tendrá un cambio alrededor de 1 JND en la crominancia de la luz transmitida por la pantalla. En el caso de 2 JND es necesario una variación de aproximadamente 3.5%.

A continuación en la Figura 59, se presentan los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento descrito para encontrar un valor estimado de 1 y 2 JND para los triestímulos Y, Z independientemente.



Figura 59. Resultados de la manipulación numérica a los valores triestimulo: a)  $Y_{15}$  fuente verde, b)  $Z_{15}$  fuente azul, y c) gráfica de la diferencia de color entre las variaciones del triestimulo  $Z_{15}$ .

De acuerdo con las ecuaciones presentadas en (28) al cambiar el valor triestímulo Y, cambian los triestímulos X, Z en igual proporción. Los resultados de la manipulación del triestímulo Y<sub>15</sub> se muestra en Figura 59 a), sólo se presentan los cambios de Y<sub>15</sub> en 0.5%, 1.0% y 2.0%, así como también los nuevos valores triestímulos (X'<sub>15</sub>, Y'<sub>15</sub>, Z'<sub>15</sub>), afectados por el mismo factor. En consecuencia, al sustituirlos en las ecuaciones de (27) para el cálculo de las coordenadas cromáticas, las nuevas coordenadas son afectadas también por el mismo factor, el cual se elimina al ser divido por si mismo y la coordenada de color conserva el valor original en cada caso como se muestra en el desarrollo:

$$Y'_{15} = Y_{15}(\Delta Y_{15}), \qquad X'_{15} = \frac{Y_{15}(\Delta Y_{15})}{y}x, \qquad Z'_{15} = \frac{Y_{15}(\Delta Y_{15})}{y}(1 - x - y)$$
$$x' = \frac{X_{15}(\Delta Y_{15})}{(\Delta Y_{15})(X_{15} + Y_{15} + Z_{15})}, \qquad y' = \frac{Y_{15}(\Delta Y_{15})}{(\Delta Y_{15})(X_{15} + Y_{15} + Z_{15})}$$
$$x = x', \qquad y = y'$$

Es decir que al variar la intensidad radiada por la fuente de color verde, no se presenta un cambio en la crominancia del color de la luz transmitida por la pantalla. Finalmente en la Figura 59 b) y c) se muestran los resultados obtenidos de la manipulación de  $Z_{15}$ . Como ha sido mencionado anteriormente, el colorímetro Minolta CA210 relaciona los triestímulos X y Z mediante la ecuación (29). Los resultados revelan que un cambio de aproximadamente ±4.2% de la intensidad radiada por la fuente azul equivale a un cambio en la cromaticidad de la luz en 1 JND, y un cambio de aproximadamente ±9.0% para 2JND. Los resultados de la manipulación numérica a los valores triestímulos muestran que al variar X y Z se cambia la crominancia de la luz, siendo el triestímulo Z el que posee una tolerancia más amplia para que el cambio sea percibido por el sistema de prueba y/o observador. Se presentan a continuación los resultados del análisis espectral.

#### VII.5 Resultados del análisis espectral

Ahora que sabemos cómo y cuánto afecta a los ajustes de gamma y uniformidad de color el cambio de la pantalla original, es pertinente caracterizar la pantalla. Basándonos en los resultados de la manipulación numérica que muestran una variación cromática, al variar la intensidad radiada de cada fuente, se propuso llevar a cabo el presente análisis midiendo las curvas de transmitancia espectral absoluta a lo largo de toda la pantalla (Figura 47), siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo VI sección 3. En los resultados se esperaba obtener la transmitancia espectral en diferentes puntos de la pantalla, y observar si en ellos existen bandas de absorción que afecten la cromaticidad de la luz transmitida. Lo anterior no fue posible debido a los siguientes factores:

- Al medir la curva de transmitancia espectral de los diferentes puntos de la pantalla, se buscaban las variaciones en dicha señal de un punto a otro. Sin embargo, no fue posible apreciar dichas variaciones de la señal debido a que se mezclaban con el ruido eléctrico del sistema.
- Por la variación de intensidad de la luz al recorrer distancias diferentes desde su proyección. La luz que se propaga sobre el eje óptico del sistema recorre una distancia menor, que la luz que se propaga hasta los extremos de la pantalla. De acuerdo con la ley del inverso cuadrado, la amplitud o energía de luz irradiada es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida. Provocando una dependencia espacial en la medición de las curvas de transmitancia espectral.

- Por la dependencia angular de la ganancia de la pantalla de retroproyección, que al ser la luz transmitida más intensa al centro, influencia la medición de transmitancia espectral con la misma dependencia angular.
- Por la dimensión del diámetro (600µm) de la fibra óptica utilizada, que es del orden de magnitud de la resolución de la pantalla, esto limita a mediciones puntuales de la uniformidad de la luz transmitida por unas cuantas microlentes que conforman la pantalla.

### VII.6 Resultados del análisis de la distribución espacial de la uniformidad del color de una pantalla

Se presentan los resultados del análisis colorimétrico de la pantalla original y sus componentes: lente de Fresnel y placa lenticular, en el cual se obtuvo un estimado del valor del corrimiento de color inducido a la luz proyectada desde el bloque óptico, por cada uno de estos independientemente. Las mediciones de color de cada sección fueron comparadas contra el color de la luz emitida por el bloque óptico  $(u'_0, v'_0)$  por medio de la ecuación (24). Los resultados del cambio de color inducido a cada sección son presentados a continuación.

#### VII.6.1 Análisis de color del bloque óptico

Se presenta en la Figura 60, la gráfica del desempeño del bloque óptico, y las fluctuaciones de color de éste durante el desarrollo del experimento final. Se dio un tiempo de calentamiento de 30 minutos al bloque óptico previo al inicio del experimento. Como se muestra en el inciso (a), el color de la luz proyectada por el bloque óptico a lo largo del experimento, aparentemente es muy estable, manteniendo un valor promedio de coordenadas: ( $u'_{0ave}=0.1694$ ,  $v'_{0ave}=0.4226$ ). Sin embargo esta gráfica no muestra las variaciones entre coordenadas a lo largo del experimento correctamente. En el inciso (b), se grafica la diferencia de color [JND] entre cada una de las mediciones realizadas a la luz del bloque óptico y el promedio de las mismas. Se aprecia fácilmente que las variaciones del color de la luz del bloque óptico son mínimas, con un valor promedio de 0.12JND.



Figura 60. Desempeño cromático del bloque óptico: a) coordenadas cromáticas (u', v') en función del tiempo, b) diferencia apenas perceptible [JND] de las variaciones cromáticas del bloque óptico en función del tiempo.

A continuación se presenta el análisis de la uniformidad de color de los componentes de la pantalla mediante el procedimiento descrito en la sección VI.4

## VII.6.2 Análisis de color de la lente de Fresnel y de la placa lenticular

Se hicieron un total de 140 mediciones cromáticas de la luz transmitida por la lente de Fresnel  $(u'_f, v'_f)$ , y por la placa lenticular  $(u'_l, v'_l)$ , mediante el método de evaluación propuesto en la sección VI.4. El cambio de color inducido por cada sección fue calculada con la ecuación (24), al sustituir la coordenada cromáticas de cada medición y la coordenada cromática de referencia. Los resultados del corrimiento del color en cada sección evaluada se muestran en la Figura 61, en el inciso (a) para la lente de Fresnel y en el inciso (b) para la placa lenticular, donde la barra de color a la derecha de las gráficas muestra el intervalo de variación de color de 0 a 2 JND.



Figura 61. Distribución espacial de la uniformidad de color de las 28 secciones en JND para: a) la lente de Fresnel y b) la placa lenticular.

Los resultados estadísticos que arroja el experimento del color de la luz transmitida por la lente Fresnel son:  $(u'_{fave}=0.1688, v'_{fave}=0.4241) \pm \sigma_{f} = 0.1378$ . Siendo los resultados estadísticos de la placa lenticular los siguientes:  $(u'_{lave}=0.1687, v'_{lave}=0.4258) \pm \sigma_{l} = 0.1285$ .

Al sustituir  $(u'_{fave}, v'_{fave})$  y  $(u'_{lave}, v'_{lave})$  contra la referencia  $(u'_{0ave}, v'_{0ave})$  en la ecuación (24), se obtiene el valor promedio del cambio de color inducido por cada componente  $(\Delta u'v')_{f}=0.4766$  y  $(\Delta u'v')_{l}=0.8475$ . La distribución normal en unidades de cambio de color inducido por la lente Fresnel y la placa lenticular, en unidades de JND se presentan en la Figura 62 a), b), respectivamente.



Figura 62. Resultados estadísticos del cambio de color inducido por: a) lente Fresnel  $\mu_f=0.48$ ,  $\sigma_i=0.14$ , b) placa lenticular  $\mu_l=0.85$ ,  $\sigma_l=0.13$  y c) pantalla  $\mu_s=1.44$ ,  $\sigma_s=0.19$ .

En la Figura 63 se presenta el histograma de los resultados experimentales del cambio de color inducido a la luz del bloque óptico, en unidades de JND, de a cada una de las secciones evaluadas. Se puede observar en los incisos (a) y (b) para la lente de Fresnel y la placa lenticular, respectivamente, la ocurrencia de los valores experimentales en cada caso. Se aprecia que la distribución de los eventos no corresponde a una distribución Gaussiana.

Después de haber caracterizado completamente la lente de Fresnel y la placa lenticular, para evaluar la contribución independiente de cada uno al cambio del color inducido a la luz proyectada desde el bloque óptico, se procedió a caracterizar la pantalla de retroproyección, y evaluar el cambio del color de la luz del bloque óptico debido a ésta.



Figura 63. Histograma de los diferentes eventos de cambio del color en unidades de JND, ocurridos en las secciones evaluadas de los componentes de la pantalla: a) lente de Fresnel, b) placa lenticular y c) la pantalla.

#### VII.6.3 Análisis de color de la pantalla

El área de medición de las 140 regiones evaluadas previamente de la lente de Fresnel y la placa lenticular fue cuidadosamente identificada, y vuelta a medir durante el análisis de la pantalla (Figura 48 b) paso 4). Los resultados del cambio del color inducido por cada sección de la pantalla ensamblada, se muestra en la Figura 64 (a), donde la barra de color a la derecha de las gráficas es el intervalo del cambio de color de 0 a 2 JND.



Figura 64 Distribución espacial de la uniformidad del color en unidades de JND de las 28 secciones a lo largo de: a) la pantalla de retroproyección, b) evaluación numérica de la tercera ley de Grassmann.

El promedio del color de la luz transmitido por la pantalla es:  $(u'_{save}=0.1692, v'_{save}=0.4283) \pm \sigma=0.1917$ . Al sustituir estos valores en la ecuación (24) contra el valor de referencia:  $(u'_{ave}=0.1694, v'_{ave}=0.4226)$ , obtenemos el promedio de cambio del color de la luz debido a la pantalla  $(\Delta u'v')_s=1.4429$ , la distribución normal del cambio de color inducido por la pantalla en unidades de JND se muestran en la Figura 62 c), y el histograma de estos eventos en la Figura 63 c).

En un esfuerzo por entender el comportamiento de las contribuciones individuales al cambio del color de la luz transmitida por cada componente, se prosiguió a hacer un análisis basándonos en las leyes de Gassmann, el cual se presenta en seguida.

### VII.6.4 Análisis de los resultados evaluando las leyes de Grassmann.

De acuerdo con las leyes de Grassmann, las imágenes a colores desplegadas por una televisión, resultan de la superposición de 3 imágenes de colores primarios (primera ley). Con el presente análisis se confirmó que la tercera ley de Grassmann (30) se cumple para nuestro caso particular. En el que el cambio del color inducido por la pantalla, es aproximadamente igual, a la suma del cambio de color inducido por la lente de Fresnel más el cambio de color inducido por la placa lenticular.

$$kC_3 = kC_1 + kC_2 \tag{30}$$

Aplicando la tercera ley de grassmann para nuestro caso, C<sub>1</sub> corresponde a la color de la luz después de la lente de Fresnel (Figura 48 b) paso 2), C<sub>2</sub> corresponde al color de la luz después de la placa lenticular (Figura 48 b) paso 3), y C<sub>3</sub> corresponde al color de la luz después de la pantalla (Figura 48 b) paso 4). De acuerdo con la información obtenida del análisis de color en el experimento anterior, se observa que la luz del bloque óptico sufre un corrimiento de color debido a la interacción con la lente de Fresnel, de 0.48 JND en promedio. Por lo anterior se entiende que, en cada caso, la coordenada cromática de la luz del bloque óptico ( $u'_{0}$ ,  $v'_{0}$ ) después de ser transmitida por la lente de Fresnel ( $u'_{fave}$ ,  $v'_{fave}$ ),

puede ser cualquiera dentro de los límites  $(u_0^{\prime}, v_0^{\prime}) \pm 0.48$  JND como resultado de dicho corrimiento, como se muestra en la Figura 65.



Figura 65. a) Corrimiento del color de la luz del bloque óptico ( $x_{ave} = 0.2438$ ,  $y_{ave} = 0.2702$ ) debido a la lente de Fresnel, representado por los puntos naranja, b) el color de la luz luego de ser transmitido por la lente de Fresnel, cambia a una coordenada cromática dentro de la elipse gris (0.48 JND).

Después de ser transmitida la luz por la lente de Fresnel y cambiada su cromaticidad, la luz alcanza a la placa lenticular, la cual por si sola induce un cambio de color promedio de 0.85 JND según se expuso en la sección anterior. Teniendo el color de la luz transmitida por la placa lenticular ( $u'_{lave}$ ,  $v'_{lave}$ ), una coordenada cromática que se pueda encontrar alrededor de la coordenada cromática de la lente de Fresnel ( $u'_{fave}$ ,  $v'_{fave}$ )  $\pm$  0.85 JND, como se muestra en la Figura 66.



Figura 66. Cambio de color promedio inducido por la placa lenticular (elipse gris oscuro), y un ejemplo de un posible corrimiento del color de la luz del bloque óptico luego de ser transmitida por la pantalla.

Usando la tercera ley de Grassmann (30), se estimó que el cambio de color inducido por el ensamble de la lente Fresnel y la placa lenticular tiene un valor de:

$$\Delta s = \Delta f + \Delta l \tag{31}$$

donde  $\Delta s$  es el corrimiento de color inducido por el ensamble con un valor calculado de 1.33 ± 0.27 JND, siendo  $\Delta f=0.48 \pm 0.14$  y  $\Delta l=0.85 \pm 0.13$  el corrimiento de color inducido por la lente de Fresnel y la placa lenticular respectivamente. El corrimiento de color medido de la pantalla ensamblada (Figura 48 b) paso 4), tiene un valor promedio de 1.44 JND ± 0.19. Existe una similitud del 92% ± 0.12 entre la medición experimental del cambio de color inducido por la pantalla, y el resultado calculado por medio de la tercera ley de Grassmann (Figura 64 (b)).

En base a los resultados anteriores, se sugiere realizar más estudios en los que se evalúen y se tomen en cuenta las contribuciones al cambio del color de la luz, inducidos por el espejo y por la lámpara de la televisión original. Lo anterior debido a la proximidad que del cambio de color inducido por la pantalla (~1.5 JND), con el valor de tolerancia de 2 JND.

### VIII Conclusiones

El presente trabajo de tesis partió del saber que una televisión de retroproyección digital ajustada en: gamma, uniformidad de color, contraste y balance de blanco, de la manera tradicional, es capaz de reproducir en la pantalla imágenes a color de buena calidad, de manera eficiente y confortable para el espectador humano. El experimento principal de esta tesis fue el estudio de la variación espacial cromática de una pantalla de retroproyección. Para dar respuesta a la falta de conocimiento respecto a la dependencia que existe entre la pantalla original, y los ajustes de gamma y uniformidad de color que se realizan al bloque óptico de la televisión, se propusieron la metodología y los experimentos siguientes:

- Influencia de las pantallas sobre el ajuste de gamma.
- Influencia de las pantallas sobre el ajuste de uniformidad de color.
- Análisis espectral de la pantalla.
- Distribución espacial de la uniformidad del color en una pantalla de retroproyección.

De los cuales se obtuvieron las siguientes conclusiones.

Fue posible comprobar que una vez que se realizan los ajustes a la televisión de la manera tradicional, se crea una dependencia entre el bloque óptico y la pantalla, ya que el cambio de la última afecta directamente el color de la luz proyectada desde el bloque óptico. Además, se pudo observar en los resultados, que cada pantalla presenta un comportamiento distinto.

Se encontró que la magnitud del cambio de color de una zona de influencia a otra, de una misma pantalla, es diferente, lo cual se debe a la distribución de potencia espectral de la luz incidente en la pantalla.

Se puede afirmar entonces, que en general, para todas las televisiones de retroproyección digital basadas en la tecnología de 3 microdisplays, existe una dependencia entre el bloque óptico ajustado, y la pantalla con la cual se realizaron los ajustes. Que de llevarse a cabo los ajustes directamente sobre el bloque óptico, antes de la integración del mismo en una televisión ensamblada, el cambio del color de la luz proyectada desde el bloque óptico será alterado, al ser transmitido por la pantalla, resultando en un desajuste en la calidad de la imagen. Por lo anterior, y para dar continuación al proyecto, es necesario saber el factor de cambio del color de la luz debido a la pantalla.

Se puede decir que los componentes de la pantalla: lente de Fresnel y placa lenticular, son de buena calidad, al inducir un cambio por debajo de 1 JND al color de la luz incidente, de manera uniforme en toda su extensión.

Fue posible determinar con la metodología propuesta, que el cambio del color de la luz del bloque óptico inducido por cualquier pantalla de retroproyección, es el resultado de la suma de los cambios individuales inducidos por la lente de Fresnel y por la placa lenticular. Lo anterior se pudo comprobar mediante la evaluación de la tercera ley de Grassmann con una similitud con los resultados experimentales, del 92%

Por lo que a pesar de la buena calidad de los componentes de la pantalla, se pudo estimar para una pantalla de una televisión de retroproyección, un factor de cambio al color de la luz proyectada desde el bloque óptico de  $1.44 \pm 0.19$  JND en promedio.

Es deseable realizar más experimentos para confirmar estadísticamente, el factor de cambio al color de la luz debido a la pantalla de la televisión. Se piensa que de encontrarse un factor que englobe a la mayoría de las pantallas, sería posible considerar realizar los ajustes al bloque óptico previo a su ensamble en una televisión, tomando en cuenta el factor de cambio de la pantalla al momento de realizar los ajuste de gamma, y uniformidad de color.

### Literatura citada

- Altman Joseph H., 1995. "Photographic films" OSA Handbook of Optics Vol 1 2<sup>nd</sup> ed. Part 6 "Imaging Detectors", Chapter 20 pages 4 9.
- Amura Alberto, 2004. "Seminario de imagen y sonido digital", Universidad Fasta,Argentina,Consultaenagostode2007.http://pub.ufasta.edu.ar/SISD/vision/percepcion.htm.
- Barocio Montemayor Daniel, Márquez Heriberto, Amaral Judith, Millán Horman, Leal Jesús, Cuen Oswaldo, 2006. "Defect Ratio Decrease on Screens of Grand Wega Rear Projection Models". Core Technology Division in SONY Baja California Tijuana, México. & CICESE Optics Department. SONY Confidential and Proprietary.
- Barocio Montemayor Daniel, Márquez Heriberto, Amaral Judith, Millán Horman, 2006. "Grand Wega Optical Block Caracterization". Core Technology Division in SONY Baja California Tijuana, México. & CICESE Optics Department. SONY Confidential and Proprietary.
- Barrett Harrison H. and Myers Kyle J, 2004. "Foundations of Image Science". John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 1540 pp.
- Bosco. "Colorimetría para televisión". Universidad de Buenos Aires, Argentina. Consulta agosto de 2007. http://www.monografias.com/trabajos5/coltele/coltele.shtml
- Broadbent, 2006. "Calculation from the original experimental data of the CIE 1931 RGB standard observer spectral chromaticity coordinates and color matching functions", Université de Sherbrooke, Canada. Consulta junio de 2007. http://www.cis.rit.edu/mcsl/research/1931.php
- Broadbent, 2006. "Trichromatic color matching", Université de Sherbrooke, Canada. Consulta junio de 2007. http://www.cis.rit.edu/mcsl/research/1931.php
- Bush Robert C., 2000. "Rear Projection Screens for Different Applications". Consulta enero de 2007. http://www.display-optics.com/technical papers.htm#top
- Cowan William, 1995. "Displays for vision research" Optics Handbook, OSA, Vol 1 Part 7 "Vision", Chapter 27 pages 3 - 8
- Davis Arthur, Bush Robert C., Harvey John C., Foley Michael F., 2001. "Fresnel Lens in Rear Projection Displays". Consulta enero de 2007. http://www.displayoptics.com/technical\_papers.htm#top

- EPSON, 2005. "Tecnología de proyección 3 LCD". Consulta agosto de 2007. http://www.3lcd.com/es/index.html
- Hecht Eugene, 2000. "Óptica, tercera edición". Addison Welsey Iberoamericana. España. 722 pp.
- Hoffmann Gernot, 2006. "CIE color space" Department of Mechanical Engineering, University of Applied Sciences, Alemania. Consulta abril de 2007. http://www.fhoemden.de/~hoffmann/howww41a.html; archivo: CIExyz29082000.

IESNA, 2007. "The IESNA Lighting Handbook, Ninth Edition". Sec/ch4/ch4.html#1

- Keller Peter, 1999. "Electronic Display Measurement: Concepts, Techniques and Instrumentation". John Wiley & Sons Inc, Series in Display Technology. New York 326 pp.
- MacAdam David L., 1942. "Visual sensitivities to color differences in daylight". Journal of the Optical Society of America. Vol 32 # 5 pag: 247 274
- Martínez Oscar, 2007. Entrevista. Departamento de Manufacture Systems Development área de Ingeniería de Equipos. SONY de Tijuana S. A. de C. V.

MINOLTA Display Color Analyzer CA210, 2002. "Instruction Manual".

- Moshe Ben Chorin, Dan Eliav, Shmuel Roth, Assaf Pagi & Ben-David, 2007. "New metric for display color gamut evaluation". Genoa Color Technologies, Israel. Consulta agosto de 2007. http://www.genoacolor.com/technology.asp?pageId=81
- Piña José Ma, 2005. "Parámetros para ajuste de crominancia". Consulta agosto 2007. http://www.invlumer.e.telefonica.net/Planificando/CROMA/Image\_CROMA\_LRGB.ht m#OJO%20y%20TEORIA%20DEL%20COLOR;
- Rea and Deng, 2006. "A system for communicating color: foundations and rationale". Light Research Center, N.Y. Consulta febrero de 2007. http://www.lrc.rpi.edu/programs/lightingTransformation/colorCommunication/index.asp
- Reflexite Display Optics, 2000. "Screen Gain and Projector Output". Technical publication FOI-123, pub 2000, Rev. 3. Consulta enero de 2007. http://www.displayoptics.com/technical\_papers.htm#top
- Robinson Michael G., Chen Jianmin, Sharp Gary D., 2005. "Polarization Engineering for LCD Projection". John Wiley & Sons Ltd, Series in Display Technology. Chichester, West Sussex, England. 290 pp.

- Roth, Ben-David, Ben-Chorin, Eliav and Ben-David, 2003. "Wide gamut, high brightness multiple primaries single panel projection displays". Genoa Color Technologies, Israel. Consulta agosto de 2007. http://www.genoacolor.com/technology.asp?pageId=81
- Sandoval Andrés, 2007. Entrevista. Departamento de Manufacture Systems Development área de Ingeniería de Equipos. SONY de Tijuana S. A. de C. V.
- Stupp Edgard H., Brennesholtz Matthew S., 1999. "Projection Displays". John Wiley & Sons Ltd, Series in Display Technology. Baffins Lane, Chichester, England. 418 pp.
- Wikipedia, 2007. "Color space". Consulta diciembre de 2006. http://en.wikipedia.org/wiki/Color\_space
- Wikipedia, 2007. "Colorimetría". Consulta agosto de 2007. http://es.wikipedia.org/wiki/Colorimetr%C3%ADa
- Wikipedia, 2007. "MacAdam ellipse". Consulta diciembre de 2006. http://en.wikipedia.org/wiki/Macadam\_Ellipse
- Yeh Pochi and Gu Claire, 1999. "Optics of Liquid Crystal Display". John Wiley & Sons Inc. New York. 427 pp.
## Apéndice A

## Sistema formador de imágenes

En las áreas de fotografía, televisión, video y gráficos computacionales, gamma ( $\gamma$ ) representa un parámetro numérico que describe la no linealidad de los diferentes dispositivos, para reproducir la intensidad de una imagen. Gamma ha resultado ser, al paso del tiempo y las tecnologías, una medida del contraste con el cual el escenario original es reproducido. Actualmente, imágenes complejas calibradas en color son indispensables para una gran variedad de aplicaciones y experimentos. Tales imágenes resultan en extremo difíciles de crear usando tecnología fotográfica. Los avances tecnológicos en gráficos computacionales han hecho de la imagen digital la tecnología dominante para tal aplicación, utilizando los monitores de televisión como dispositivos de despliegue de dichas imágenes calibradas (Cowan, 1995). En este apéndice se describe la respuesta del brillo de las tecnologías previamente mencionadas.

#### A.1 Fotografía

En fotografía la imagen se forma sobre la película fotográfica, la cual está conformada por una emulsión de cristales de haluros de plata (granos) dispersos en una gelatina (Altman 1995) siendo el grano el elemento fotosensible. Cuando el grano es expuesto por un tiempo a la radiación luminosa (E), se forma una imagen fija en la película fotográfica, la cual es revelada por un proceso químico. A la relación que resulta entre la energía luminosa y el tiempo (t) que ésta incide sobre los granos fotosensibles, se le denomina exposición (H) la cual se puede calcular usando la siguiente ecuación:

$$H = Et \tag{32}$$

En el campo de la fotografía la respuesta del grano a la radiación incidente se mide en términos de densidad óptica, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$D = -\log_{10} T = \log_{10} 1/T \tag{33}$$

donde T corresponde a la transmitancia de la película fotográfica. En el procedimiento de someter muestras de películas fotográficas a una serie de variaciones de exposición, las densidades ópticas resultantes son graficadas contra el logaritmo de la exposición que las produjo. La curva resultante es conocida como la "curva H&D" en honor a los pioneros de la sensitometría fotográfica; los científicos ingleses Hurter y Driffield (1891). En la Figura 67 se muestra una típica curva H&D.





La curva esta dividida en tres regiones, "el dedo del pie", "la línea recta" y "el hombro". La ecuación de la "línea recta" esta descrita por la siguiente ecuación:

$$D = \gamma(\log H - \log C) \tag{34}$$

Donde  $\gamma$  (gamma) es la pendiente de la "línea recta" y C es la exposición en el punto en el cual la extrapolación de la línea corta al eje de exposición. Usando antilogaritmos de la ecuación (3) se obtiene:

$$T = \left(\frac{H}{C}\right)^{-\gamma} \tag{35}$$

La ecuación (35) representa el cambio en la transmitancia de la película fotográfica en función de la exposición y de gamma. Tradicionalmente, gamma es conocida como la pendiente de la "línea recta" de la curva H&D, y es una medida del contraste con el cual el objeto original es reproducido cuando su imagen fija se forma sobre la película fotográfica.

#### A.2 Televisión

Las primeras televisiones basadas en la tecnología de tubo de rayos catódicos (CRT), son ahora el punto de referencia para las nuevas tecnologías emergentes de pantalla plana, como las de cristal líquido (LCD) las cuales se han tornado muy competitivas en calidad de imagen, costo y eficiencia energética. La televisión de color de CRT se deriva de la televisión a blanco y negro de CRT, por lo que ambas comparten algunas características de diseño. En la Figura 68 se muestra el sistema de visualización, el tubo de rayos catódicos, de una televisión de CRT blanco y negro.



Figura 68. Diagrama esquemático de un CRT monocromático.

El CRT es una pieza de vidrio sellada al vacío que incluye a la pantalla de despliegue. Un flujo de electrones es emitido desde el cátodo formando un haz de electrones con una corriente (I<sub>B</sub>), la cual está determinada por la rejilla de control. Una variedad de electrodos enfoca, acelera y refracta al haz de electrones hacia el fósforo depositado en la pantalla. El haz de electrones incidente en el fósforo de la pantalla produce un punto brilloso cuya intensidad depende de la corriente del haz de electrones que es controlada por el voltaje aplicado a la rejilla de control. Esta señal de voltaje es amplificada para controlar la corriente (I<sub>B</sub>) del haz de electrones a través de la rejilla de control. Una de las características importantes de la amplificación de la señal de voltaje para formar una imagen calibrada es el ajuste de gamma. Esto es, la relación que existe entre la señal de voltaje y el brillo de la luz emitida por el fósforo en la pantalla. Esta relación está determinada por los amplificadores y la rejilla de control. El ajuste de gamma ( $\gamma$ ) puede ser expresado de la siguiente forma:

$$\Phi = \Phi_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\gamma} \tag{36}$$

donde V es el voltaje de entrada, y V<sub>0</sub> es el valor de voltaje máximo. El exponente  $\gamma$  representa a la pendiente de la línea del brillo en función del voltaje. Las televisiones de CRT poseen varios controles que ajustan diferentes propiedades del haz de electrones como son: brillo, contraste, tamaño de imagen etc. Al variar el control del brillo se varía directamente el exponente gamma ( $\gamma$ ) de la ecuación (36). Esta relación de cambio entre el brillo y el voltaje aplicado se muestra en la Figura 69.



Figura 69. Curva del contraste de una televisión de CRT.

### A.3 Cristal líquido

En la actual era de la informática, el despliegue de información se ha vuelto parte de la vida cotidiana, esto requiere sistemas de visualización o despliegue avanzados como lo son los televisores de LCD (Yeh y Gu, 1999). Dichos sistemas se encuentran entre los más importantes de la actualidad debido a las características propias de alta resolución y bajo consumo de energía. Los sistemas de visualización (microdisplays) basados en LCD están

formados por un arreglo bidimensional de pixeles o matriz activa (p. e. 1920 x 1080). En la Figura 70 b) se muestra un diagrama esquemático de un elemento básico del microdisplay de LCD conocido como elemento de imagen o píxel (Picture element). Cada píxel funciona como una válvula de luz independiente que transmite o extingue la luz para generar una imagen.



Figura 70. Dispositivo formador de imágenes basado en la tecnología de Cristal líquido: a) matriz activa de un microdisplay, b) estructura de un elemento de imagen (Píxel).

Un píxel consiste de una fina capa de cristal líquido (LC; liquid crystal) atrapada entre dos electrodos transparentes (e.g. indium tin oxide ITO), dos sustratos de vidrio, y un par de polarizadores cruzados. Los electrodos y los polarizadores se pegan con cemento óptico uno en cada lado de los sustratos. Se utilizan espaciadores de fibra de vidrio o microesferas de plástico para separar los sustratos de vidrio y controlar el grosor de la capa de cristal líquido contenido entre ambos sustratos. Son 3 las configuraciones de cristal líquido que pueden ser usadas para aplicaciones de despliegue de información: Splay, Twist y Bend. La alineación de las moléculas de cristal líquido esta determinada por su configuración y por las restricciones físicas de la construcción del panel. El cristal líquido posee 3 fases: esmética, nemática y colestérica. En la Figura 71 se muestran la fase nemática y la fase colestérica, en la primera las moléculas de cristal líquido forman largas cadenas ordenadas con una misma orientación, la segunda es una de tipo nemático, nemático torcido (Twisted Nematic; TN), éstas se componen de moléculas quirales, además la molécula adquiere una torción helicoidal normal a su vector director (n). El vector director (n) es un vector unitario paralelo al eje mayor de orientación de las moléculas.



Figura 71. Dos tipos del cristal líquido: a) fase nemática, b) distribución de moléculas de fase colestérica en diferentes planos perpendiculares al eje helicoidal.

#### A.3.1 90° Twisted nematic LCD

En los dispositivos de cristal líquido con fase TN, la luz incidente es polarizada verticalmente ( $\Phi$ =90°) por el polarizador lineal de entrada. La luz polarizada (L) se propaga a través del cristal líquido rotando de acuerdo con la dirección del vector director (n) a lo

largo de la cadena, a este ángulo se le conoce con el nombre de ángulo de torción ( $\Phi$ ), esta acción se muestra en la Figura 72. Al final de la cadena de cristal líquido el estado de polarización (L) ha sido rotado 90° y ahora tiene una orientación horizontal ( $\Phi$ =0°) coincidiendo con la orientación del polarizador lineal a la salida del píxel. Los ejes de transmisión de ambos polarizadores se alinean con los correspondientes vectores directores (n<sub>in</sub>, n<sub>out</sub>) de cada extremo de la molécula de cristal líquido permitiendo así la transmisión de la luz. Esta configuración se conoce por el nombre de "normalmente blanco", ya que la luz es transmitida sin la necesidad de un voltaje externo.



**Figura 72.** Principio de operación del 90° TN LCD, a) transmisión de la luz a través del píxel normalmente blanco, b) vista frontal de la molécula torcida de cristal líquido donde  $\Phi$  es el ángulo de torsión (twist), L representa el estado de polarización lineal de la luz y n es el vector director de cada molécula.

Al aplicar un voltaje a los electrodos mayor que el voltaje umbral, las moléculas del cristal líquido tienden a alinearse en la dirección de propagación (z) del campo eléctrico (E) inducido, este campo estresa las moléculas inclinándolas un ángulo  $\theta$  hasta acostarlas como se muestra en la Figura 73.



Figura 73. Ángulo de inclinación  $\theta$ , vista lateral de una cadena de moléculas de cristal líquido entre las dos placas de vidrio, los vectores directores de las moléculas a los extremos se mantienen perpendiculares.

Aplicando un voltaje lo suficientemente alto (~ 5v) la mayoría de las moléculas se alinean paralelas al campo eléctrico. Bajo estas condiciones, el estado de polarización lineal (L) de la luz que se propaga por el cristal líquido permanece inalterado, es decir, el estado de polarización (L) no rota y la luz polarizada verticalmente ( $\Phi$ =90°) es extinguida por el polarizador lineal ( $\Phi$ =0°) a la salida del píxel. De esta manera, al variar la señal de voltaje aplicado a los electrodos de cada píxel, es posible modular espacialmente la transmisión de la luz a través de cada píxel. En la Figura 74 se muestra el principio de operación del sistema de visualización con fase TN.



Figura 74. Funcionamiento básico del TN-LCD, a) rotación de 90° de la luz al ser transmitida a través del píxel, b) extinción de la luz del pixel al aplicar un voltaje mucho mayor al voltaje umbral ( $V_U$ ).

# A.3.2 Respuesta de un microdisplay TN-LCD normalmente blanco

En un panel de 90° TN LCD, las moléculas de cristal líquido en las fronteras (electrodo - cristal líquido - electrodo) permanecen inmóviles y perpendiculares entre si ( $\Phi_{in}=0^{\circ}$ ,  $\Phi_{out}=90^{\circ}$ ), debido a la fuerte interacción molecular entre las superficies correspondientes. El ángulo de torsión ( $\Phi$ ) de los vectores directores varía gradualmente de 0° a 90° debido a las condiciones de frontera. Cuando se aplica un voltaje a los electrodos, las moléculas de cristal líquido responden al campo eléctrico (E) inclinándose un ángulo  $\theta$  y variando el ángulo de torsión  $\Phi$ . En la Figura 75 se muestra la variación del ángulo de inclinación  $\theta$  y del ángulo de torsión  $\Phi$ , para varios voltajes en función de la distancia que separa los sustratos de vidrio (d) y la posición de la molécula de LC dentro de la cadena (z), para una mezcla de ZLI-1646 de cristal líquido cuyo voltaje umbral es aproximadamente 1.275v. Como se aprecia en la Figura 75 y en la Tabla , los valores del ángulo de torsión ( $\Phi$ ) al inicio, a la mitad y al final de la molécula son los mismos en cada caso para los tres voltajes. Al centro de la molécula, el ángulo de inclinación ( $\theta$ ) se aproxima a 90° cuando el voltaje aplicado (5.5v) es mucho mayor al voltaje umbral (1.275v). Bajo estas condiciones, las moléculas de cristal líquido sufre una transición brusca de 0° a 90° ( $\Phi$ ) en la parte central de la cadena. Queda representado en la Figura 75 la respuesta natural de un microdisplay TN de cristal líquido a un voltaje de entrada aplicado en sus terminales.



Figura 75. Variación de los ángulos de inclinación y torsión del vector director (n)\*.

En la Figura 76 a) se muestra un ejemplo de la transmitancia de un microdisplay TN-LCD normalmente blanco usando luz no polarizada. La luz transmitida por el mismo se mantiene constante para cualquier voltaje menor que el voltaje umbral ( $V_U$ ), conforme se incrementa el voltaje más allá del  $V_U$ , las moléculas se alinean en dirección del campo eléctrico (E), y el estado de polarización (L) de la luz no es capaz de seguir el cambio en la dirección del vector director (n) disminuyendo la luz transmitida por el píxel.



Figura 76. Curvas de respuestas de un panel de 90° TN-LND normalmente blanco: a) curva de transmitancia, b) curva de contraste.

<sup>\*</sup> Yeh Pochi, Gu Claire; Optics of liquid crystal displays

El contraste de cualquier sistema de despliegue de imágenes se define como: la razón del nivel de brillo entre el nivel de oscuridad, en éste caso, una razón entre la transmitancia máxima y la transmisión mínima que puede generar el sistema. En el caso del 90° TN-LCD normalmente blanco, el contraste esta en función del voltaje aplicado a los electrodos por la siguiente expresión:

$$C_{NB} = \frac{T(0)}{T(V)} \tag{37}$$

Donde T es la transmisión del panel. Se puede observar en la ecuación que el contraste aumenta con el voltaje, ya que en un panel normalmente blanco el valor de T(0) permanece relativamente constante (blanco) y el valor de T(V) disminuye tendiendo a cero (negro) al aumentar el voltaje. En la Figura 76 b) se observa una curva de contraste para un panel normalmente blanco.

z/d	V=1.29 v		V=2.10 v		V=5.50v	
	θ(°)	<b>(°)</b>	0(°)	<b>(°)</b>	θ(°)	Φ(°)
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.025	0.8	2.3	7.5	1.6	24.6	0.0
0.075	2.3	6.8	22.3	4.8	54.7	0.0
0.125	3.8	11.4	33,7	7.8	69.4	0.0
0.175	5.2	15.9	42.5	10.9	77.9	0.1
0.225	6.5	20.5	49.4	14.4	82.8	0.2
0.275	7.6	25.0	54.7	18.3	85.4	0.6
0.325	8.5	29.4	58.8	23.0	87.2	2.3
0.375	9.2	33.9	61.7	28.5	88.3	4.9
0.425	9.7	38.3	63.7	34.6	89.0	16.9
0.475	9.9	42.8	64.7	41.4	89.3	35.6
0.500	9.9	45.0	64.7	45.0	89,3	.45.0
0.525	9,9	47.2	64.7	48,6	89.3	54.4
0.575	9.7	51.7	63.7	55.4	89.0	73.1
0.625	9.2	56,1	61.7	61.5	88,3	85.1
0.675	8.5	60.6	58.8	67.0	87.2	87.7
0.725	7.6	65.0	54.7	71.7	85.4	89.4
0.775	6.5	69.5	49,4	75,6	82.8	89.8
0.825	5.2	74.1	42.5	79.1	77.9	90.0
0.875	3.8	78.6	33.7	82.2	69.4	90.0
0.925	2.3	83.2	22.3	85,2	54,7	90,0
0.975	0.8	87.7	7.5	88.4	24.6	90.0
1 000	0.0	90.0	0.0	90.0	0.0	900

Tabla VII. Valores de  $\theta$  y  $\Phi$  a lo largo de la molécula de cristal líquido.