

FUNDAMENTOS DEL VIDEO ANÁLOGO Y DIGITAL

1 VIDEO ANÁLOGO

En un sistema análogo, la información se transmite mediante alguna variación infinita de un parámetro continuo como puede ser la tensión en un hilo o la intensidad de flujo de una cinta (véase la Figura 26). En un equipo de grabación, la distancia a lo largo del soporte físico es un elemento análogo continuo más del tiempo. No importa en que punto se examine una grabación a lo largo de toda su extensión: se encontrará un valor para la señal grabada. Dicho valor puede variar con una resolución infinita dentro de los límites físicos del sistema.

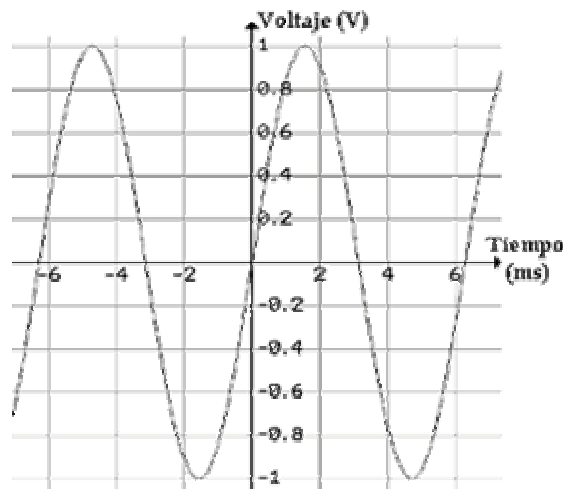


Figura 26. Variación infinita de un parámetro continuo en función del tiempo

Dichas características suponen la debilidad principal de las señales análogas. Dentro del ancho de banda permisible, cualquier forma de onda es válida. Si la velocidad del soporte no es constante, una forma de onda que sea válida pasará a ser otra forma de onda también válida; no es posible detectar un error de base de tiempos en un sistema análogo. Además, un error de tensión tan sólo hace variar un valor de tensión válido en otro; el ruido no puede detectarse en un sistema análogo. Se puede tener la sospecha de que existe ruido, pero no se sabe qué proporción de la señal recibida corresponde al ruido y cual es la señal original. Si la función de transferencia de un sistema no es lineal, se producirán distorsiones, pero las formas de onda distorsionadas aún serán válidas; un sistema análogo es incapaz de detectar distorsiones.

Es característico de los sistemas análogos el hecho de que las degradaciones no puedan ser separadas de la señal original, por lo que nada pueda hacerse al respecto. Al final de un sistema determinado la señal estará formada por la suma de todas las degradaciones introducidas en cada etapa por las que haya pasado. Esto limita el número de etapas por las que una señal puede pasar sin que quede inutilizable.

1.1 Proceso de exploración de la imagen. Se debe recordar que todas las normas vigentes de televisión en la actualidad, NTSC (National Television Systems Comitee), PAL (Phase Alternation Line) y SECAM (Système Electronique Color Avec Memoire) se derivan, directa o indirectamente, de los estándares en blanco y negro definidos en los años 40 y 50.

Estas primeras emisiones utilizaban un barrido progresivo (todas las líneas de la imagen se barren consecutivamente, como se puede ver en la Figura 27).

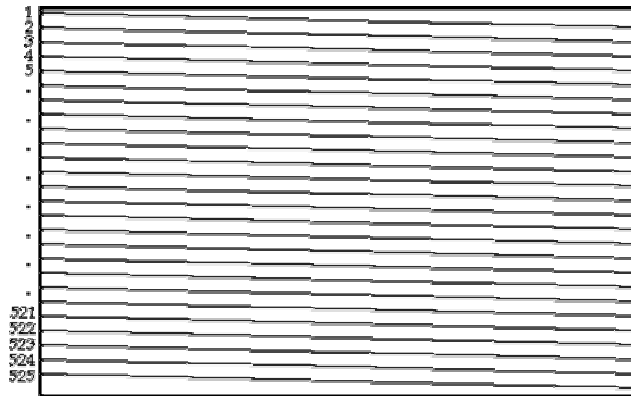
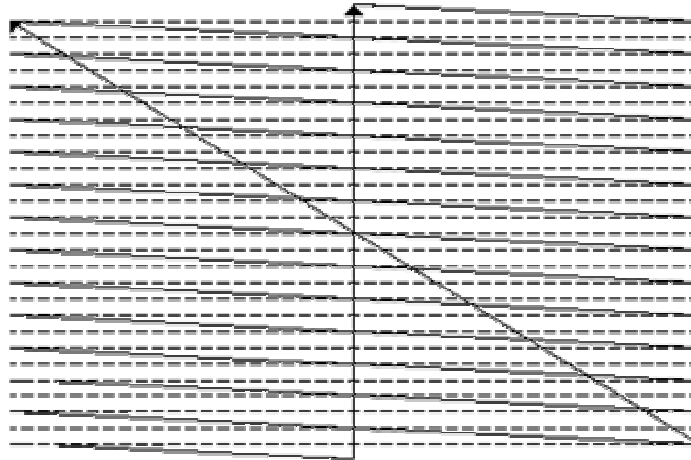


Figura 27. Representación simplificada del barrido progresivo

Por razones de orden práctico (radiaciones debidas a fugas magnéticas de los transformadores de alimentación, filtrados imperfectos), fue indispensable utilizar una frecuencia de imagen que estuviera relacionada con la frecuencia de la red (60 Hz en EE.UU., 50 Hz en Europa) para minimizar el efecto visual de estas imperfecciones; la frecuencia de exploración fue, por tanto, de 30 imágenes/s en EE.UU. y de 25 imágenes/s en Europa. Estas primeras imágenes presentaban un parpadeo bastante molesto (también llamado flicker de campo).

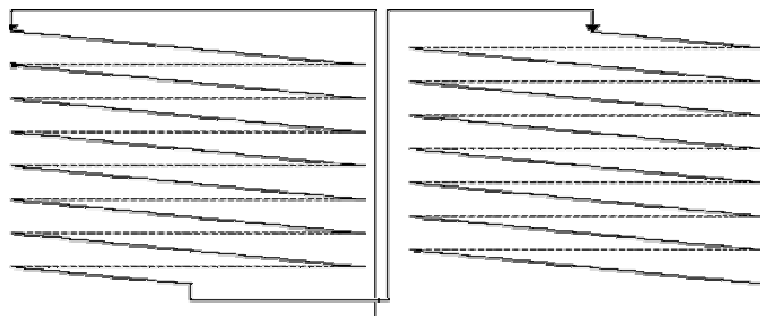
Tiempo después la captación de la imagen se hizo electrónica, haciendo que las definiciones alcanzaran un mayor número de líneas, esto gracias al barrido entrelazado.

1.1.1 Barrido entrelazado. Consiste en la transmisión de un primer campo compuesto por las líneas impares de la imagen y a continuación un segundo campo formado por las líneas pares, como se ve en la Figura 28. Esta forma de barrer la imagen, permite duplicar la frecuencia de refresco de la pantalla (50 o 60 Hz, en lugar de los 25 o 30 Hz) sin aumentar el ancho de banda para un número de líneas dado. Como se ve en la Figura 29, el barrido entrelazado se obtiene utilizando un número impar de líneas, por ejemplo 525 o 625 líneas que constituyen un cuadro, de manera que el primer campo comience en una línea completa, terminando en la mitad de otra línea, y el segundo campo comience en la mitad de una línea y finalice con una línea completa. En los países donde la frecuencia de la red es de 60 Hz, la velocidad de cuadro es de 30 por segundo y, por consiguiente, la frecuencia de campo es de 60 Hz.



Cuadro completo

Figura 28. Barrido entrelazado 2:1



El primer campo comienza con una línea completa y finaliza con media línea El segundo campo comienza con media línea y finaliza con una línea completa

Campo 1

Campo 2



Debe haber un número impar de líneas en cada cuadro

Figura 29. Los campos de un entrelazado 2:1

1.2 Frecuencias de exploración horizontal y vertical. La velocidad de campo de 60 Hz es la frecuencia de exploración vertical. Este es el ritmo con que el haz electrónico completa su ciclo de movimiento vertical, desde la parte superior hasta la parte inferior de la pantalla para volver nuevamente a la parte superior.

El número de líneas de exploración horizontal de un campo es la mitad del total de las 525 líneas de un cuadro completo (en el sistema NTSC), ya que un campo contiene la mitad de las líneas. Esto da por resultado 262.5 líneas horizontales para cada campo.

Como el tiempo que corresponde a un campo es 1/60s y cada campo contiene 262.5 líneas, el número de líneas por segundo es:

$$262.5 \times 60 = 15750 \text{ líneas/s}$$

Esta frecuencia de 15750 Hz es la velocidad con que el haz electrónico completa su ciclo de movimiento horizontal de izquierda a derecha y regresa nuevamente a la izquierda.

1.2.1 Tiempo de línea horizontal. El tiempo durante el cual se realiza la exploración de una línea horizontal es:

$$1/15750 \gg 63.5\text{ms}$$

1.3 Las señales de color. El sistema para la televisión en color es el mismo que para la televisión monocromática excepto que también se utiliza la información de color. Esto se realiza considerando la información de imágenes en términos de rojo, verde y azul. Cuando es explorada la imagen en la cámara, se producen señales de video separadas para la información de rojo, verde y azul de la imagen. Filtros de color separan los colores para la cámara. Sin embargo, para el canal estándar de 6 MHz de televisión, las señales de video de rojo, verde y azul son combinadas de modo que se forman dos señales equivalentes, una correspondiente al brillo y otra para el color. Específicamente las dos señales transmitidas son las siguientes:

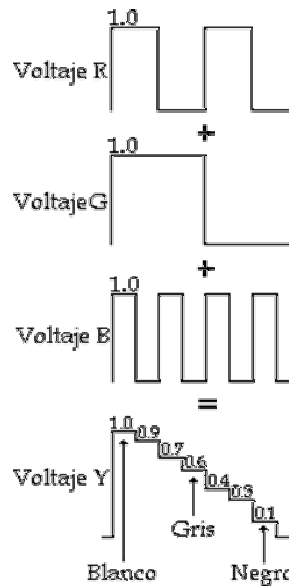
Señal de luminancia: Contiene solo variaciones de brillo de la información de la imagen, incluyendo los detalles finos, lo mismo que en una señal monocromática. La señal de luminancia se utiliza para reproducir la imagen en blanco y negro, o monocroma. La señal de luminancia o Y se forma combinando 30% de la señal de video roja (R), 59% de la señal de video verde (G) y 11% de la señal de video azul (B), y su expresión es:

$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B$$

Los porcentajes que se muestran en la ecuación corresponden a la brillantez relativa de los tres colores primarios (ver Anexo 1). En consecuencia, una escena reproducida en blanco y negro por la señal Y tiene exactamente la misma brillantez que la imagen original. La Figura 30 muestra como el voltaje de la señal Y se compone de varios valores de R, G y B. La señal Y tiene una máxima amplitud relativa de unidad, la cual es 100% blanca. Para los máximos valores de R, G y B (1V cada uno), el valor de brillantez se determina de la siguiente manera:

$$Y = 0.30(1) + 0.59(1) + 0.11(1) = 1 \text{ lumen}$$

Los valores de voltaje para Y que se ilustran en la Figura 31 son los valores de luminancia relativos que corresponden a cada color.



$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B$$

Figura 30. Obtención de la señal Y

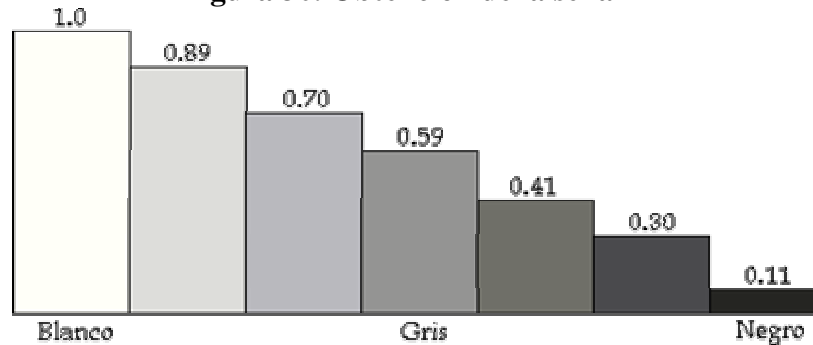


Figura 31. Valores de luminancia relativa

Señal de crominancia: La señal de crominancia es una combinación de las señales de color I y Q. La señal I o señal de color en fase se genera combinando el 60% de la señal de video en rojo (R), 28% de la señal de video en verde (G) invertida y 32% de la señal de video en azul (B) invertida, y se expresa como:

$$I = 0.60R - 0.28G - 0.32B$$

La señal Q o señal de color en cuadratura se genera combinando el 21% de la señal de video en rojo (R), 52% de la señal de video en verde (G) invertido y 31% de la señal de video en azul (B), y su expresión es:

$$Q = 0.21R - 0.52G + 0.31B$$

Las señales I y Q se combinan para producir la señal C y debido a que las señales I y Q están en cuadratura, la señal C o crominancia es la suma vectorial de estas, y su expresión es:

$$C = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

$$\tan^{-1} \frac{Q}{I}$$

Las amplitudes de las señales I y Q son, en cambio, proporcionales a las señales de video R, G y B. La Figura 32 muestra la rueda de colores para la radiodifusión de televisión. Las señales R- Y y B- Y se utilizan en la mayor parte de los receptores de televisión a color para demodular las señales de video R, G y B. En el receptor, la señal C reproduce colores en proporción a las amplitudes de las señales I y Q. El matiz (o tono del color) se determina por la fase de la señal C y la profundidad o saturación es proporcional a la magnitud de la señal C. La parte exterior del círculo corresponde al valor relativo de 1.

2 VIDEO DIGITAL

La digitalización de una señal de video tiene lugar en tres pasos:

- Muestreo
- Cuantificación
- Codificación

2.1 Muestreo. Sea una señal análoga $e(t)$ como la representada en el Figura 33. Se toman muestras breves de $e(t)$ cada 15° a partir de $t=0$. En 360° se habrán explorado 24 muestras. El resultado será una serie de impulsos cortos cuyas amplitudes siguen a la señal análoga. A este tren de impulsos modulados en amplitud por la señal análoga se le denomina señal PAM (Pulse Amplitude Modulation o Modulación por Amplitud de Pulsos).

Este muestreo puede representarse por la multiplicación de la señal análoga $e(t)$ por un tren de impulsos $u(t)$, dando por resultado la señal de la parte inferior de la Figura 33.

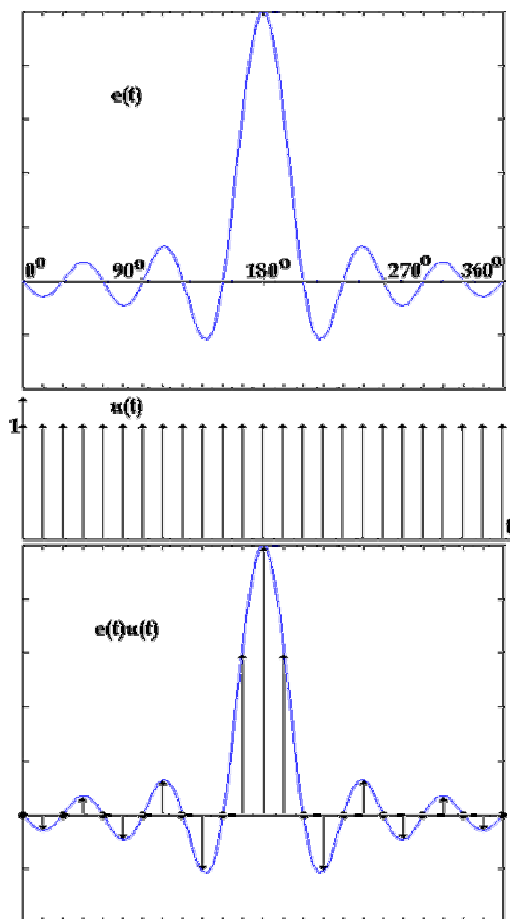


Figura 33. Muestreo de una señal análoga $e(t)$ por un tren de impulsos $u(t)$

Ahora bien, una señal de video está compuesta por un gran número de frecuencias formando un espectro continuo que va desde 0 a unos 5 MHz como se representa en la Figura 38.

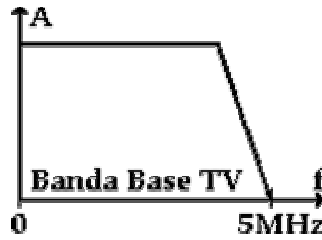


Figura 38. Banda base de la señal de video

Al muestrear esta señal, cada frecuencia de video aparecerá en las bandas laterales superiores e inferiores de cada armónico de la frecuencia de muestreo, incluyendo naturalmente la banda base, esto es, el armónico cero.

El espectro de la señal muestreada se presentará por tanto, como se ve en la Figura 39. De esta misma figura se deduce una condición elemental que debe cumplirse: que $f_o > 2f_s$ para que la banda lateral inferior de la frecuencia de muestreo y la banda base no se superpongan.

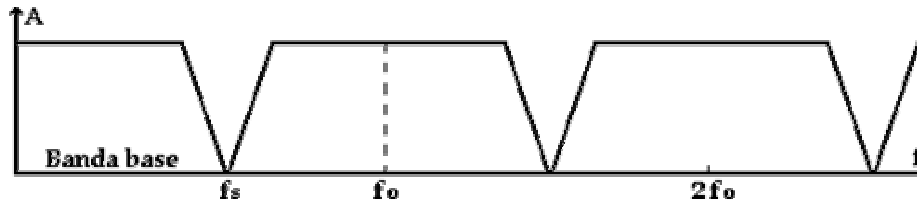


Figura 39. Espectro de una señal de video muestreada a la frecuencia f_o

2.1.1 "Aliasing". Este razonamiento fue deducido por Nyquist-Shannon, al establecer que para conseguir un muestreo-recuperación sin distorsión, se requiere que la frecuencia de muestreo f_o sea al menos dos veces más elevada que la frecuencia máxima presente en la señal análoga muestreada.

La recuperación de la banda base se realizaría con un filtro pasa bajo que corte todas las frecuencias superiores a $f_o/2$. De no cumplirse el teorema del muestreo de Nyquist, el filtro dejaría pasar frecuencias pertenecientes a la banda lateral inferior contaminantes de la banda base, que producirían solapamientos con las frecuencias más altas de la misma. Este efecto se denomina "aliasing" (ver la Figura 40).

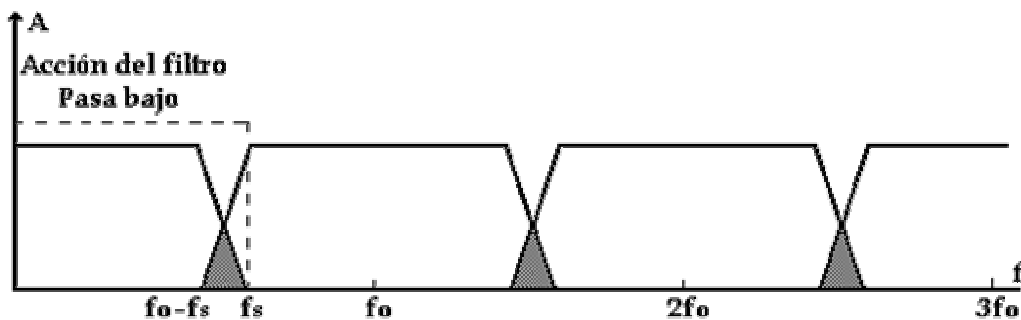


Figura 40. Cuando la frecuencia de muestreo es $f_o < 2f_s$

Otro motivo de "aliasing" se produce cuando el filtro no está bien calculado y permite el paso de frecuencias de la banda lateral inferior, aunque no estén solapadas con la banda base (ver la Figura 41).

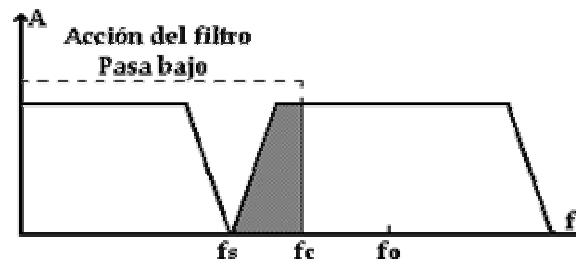


Figura 41. Cuando la frecuencia de corte del filtro PB es superior a $f_o - f_s$

2.2 Cuantificación. Así se denomina al proceso mediante el cual se atribuye a cada muestra un valor de amplitud dentro de un margen de niveles previamente fijado. Este valor se representa por un número que será convertido a un código de ceros y unos en el proceso de codificación.

Por razones de facilidad en los cálculos, el número de niveles se hace coincidir con una potencia de dos y los impulsos de la señal PAM se redondean al valor superior o inferior según sobrepasen o no la mitad del ancho del nivel en que se encuentran.

El error que se produjo con estas aproximaciones equivale a sumar una señal errónea a los valores exactos de las muestras, como se ve en la Figura 42.

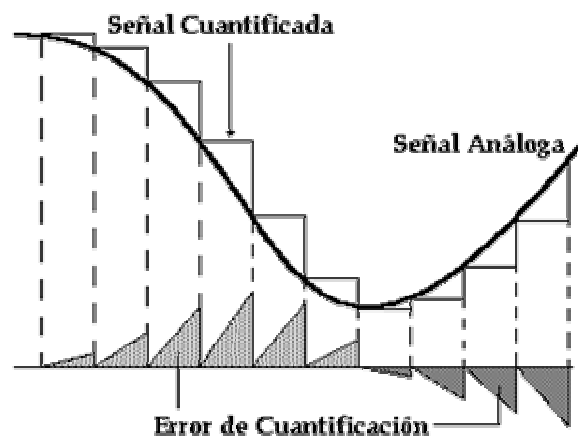


Figura 42. Error de cuantificación

Esta señal errónea aparecerá en el proceso de recuperación después de la decodificación digital-análoga, en forma de ruido visible. Se habla así de "ruido de cuantificación" que dependerá obviamente del número N de niveles empleados en el proceso. Cuantos más niveles existan menor será el ruido generado. La relación señal/ruido de cuantificación es:

$$\frac{S}{C} = (20 \log N + 10.8) \text{ dB}$$

de cuyo resultado se sacan las siguientes conclusiones:

- La relación señal/ruido de cuantificación depende únicamente del número de niveles N en que se subdivide la excursión completa de la señal.
- Existe un sumando constante 10.8 dB que tiene su origen en la misma definición de señal/ruido en televisión, donde se toma para la señal el valor pico a pico y para el ruido su valor eficaz.

Es evidente que usando codificación binaria resulta $N=2^m$, donde m =número de bits, por tanto:

$$\frac{S}{C} = (6m + 10.8) \text{ dB}$$

La anterior ecuación es válida para la digitalización de una señal monocroma o para cada componente de color.

Se adoptaron 8bits para la digitalización de la señal de video, por lo que la relación señal/ruido de cuantificación queda como:

$$\frac{S}{C} = 6(8) + 10.8 = 58.8 \text{ dB}$$

2.3 Codificación. La codificación final de la señal de salida de un equipo depende de su aplicación. Puede usarse por ejemplo un código binario puro o un código de complemento a dos para aplicaciones locales. Pero cuando se trata de aplicaciones específicas, la codificación se convierte en un tema trascendente.

2.4 Formatos de codificación. Dos planteamientos aparentemente contradictorios se mantienen aún hoy día acerca de la digitalización de la señal de televisión en color:

- La codificación de señales compuestas. Ver la Figura 45.
- La codificación de componentes. Ver la Figura 46.



Figura 45. Codificación de la señal compuesta

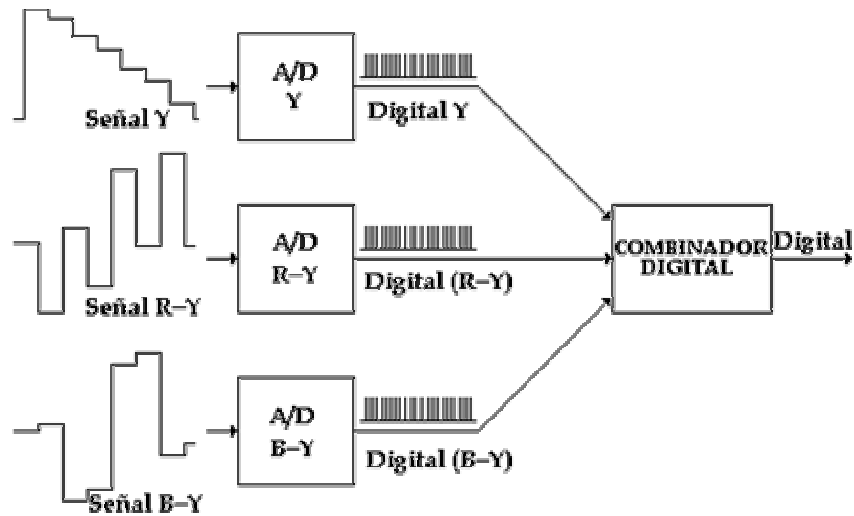


Figura 46. Codificación de componentes

2.4.1 Codificación de las señales compuestas. Esta propuesta consiste en digitalizar directamente las señales compuestas existentes (NTSC, PAL, SECAM). Con ello persiste el problema de la incompatibilidad de las distintas normas internacionales, aun manteniendo la misma frecuencia de muestreo y codificación. La decodificación devolvería las señales NTSC, PAL o SECAM, respectivamente.

La ventaja fundamental de digitalizar la señal compuesta radica en que el equipo puede incluirse como una unidad mas en los Estudios análogos actualmente en servicio, sin necesidad de codificar o decodificar el NTSC, PAL o SECAM.

La Figura 47 muestra como opera el tratamiento de imágenes análogas durante la transición de la televisión análoga a digital, para el caso de codificación de señales compuestas.

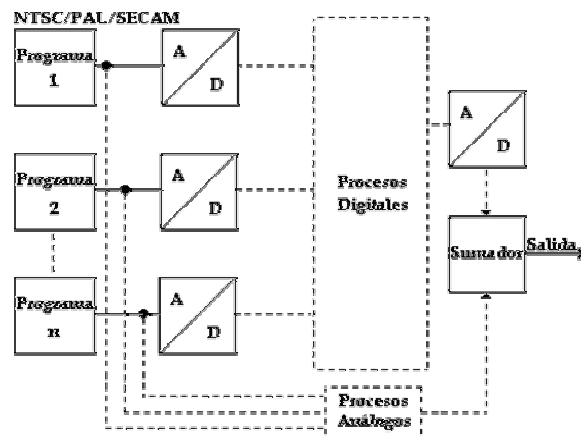


Figura 47. Transición de análogo a digital de las señales compuestas

Pasada la transición, la única ventaja que puede aportar la codificación de señales compuestas es el tratamiento de una señal única de video como ocurre actualmente en los Estudios análogos. Para los casos NTSC y PAL que modulan en amplitud a la subportadora de color, el fundido, mezcla y encadenado corresponderá a una sencilla multiplicación de

todas las muestras por un factor situado entre 0 y 1. Pero en el caso del SECAM, es necesario descomponer primero la señal de video en sus componentes Y, R-Y, B-Y antes de la mezcla. Este problema elimina esta ventaja para el SECAM.

Y en todo caso, cada fuente de video digital tendría que disponer de codificación y decodificación NTSC/PAL/SECAM, lo que representa una degradación de las imágenes por causa de los sucesivos procesos de codificación-decodificación.

Así, se concluye que en el horizonte se encuentra la digitalización global de las señales en componentes.

2.4.2 Codificación en componentes. Por este método se digitalizan las tres señales Y, $K_1(R-Y)$, $K_2(B-Y)$ donde K_1 y K_2 son factores de ponderación que imponen el sistema digital. Estos factores no tienen los mismos valores que los coeficientes ponderados de NTSC, PAL o SECAM.

La primera y gran ventaja que se deriva de esta codificación es que siendo estas tres señales comunes a todos los sistemas, la compatibilidad puede alcanzarse por regulación internacional de los parámetros de muestreo, cuantificación y codificación. En tal sentido el CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications o Comité Consultivo Internacional de Radio Comunicaciones) emitió en 1982 la norma 4:2:2 CCIR 601 de televisión digital en componentes.

La segunda ventaja de esta codificación es que una vez alcanzada la digitalización plena de la producción, sólo se requiere un paso final de conversión D/A y una codificación NTSC, PAL o SECAM según el sistema adoptado de transmisión.

Se añade a las ventajas ya señaladas que el tratamiento digital en componentes elimina los efectos perturbadores mutuos de luminancia y crominancia a la vez que en edición electrónica desaparecen los problemas derivados de la estructura de 4 y 8 campos NTSC y PAL respectivamente. Sólo habría de tenerse en cuenta la estructura de dos campos entrelazados como en televisión en blanco y negro.

2.4.3 La norma CCIR 601 de televisión digital o norma 4:2:2. Esta norma define los parámetros básicos del sistema de televisión digital que aseguran la mayor compatibilidad mundial.

Se basa en una señal Y, Cr, Cb en el formato llamado 4:2:2 (4 muestreos Y por 2 muestreos Cr y 2 muestreos Cb), con una digitalización sobre 8 bits, con posibilidad de ampliarla a 10 bits para aplicaciones más exigentes.

Cualquiera que sea el estándar de barrido, la frecuencia de muestreo es de 13.5 MHz para la luminancia Y. Para las señales de crominancia Cr y Cb, dado su ancho de banda más limitado se muestrean a la mitad de la frecuencia de la luminancia, es decir, 6.75 MHz. Lo que se corresponde con una definición de 720 muestreos por línea en luminancia y de 360 muestreos por línea de crominancia, cuya posición coincide con la de los muestreos impares de luminancia. Ver la Figura 49.

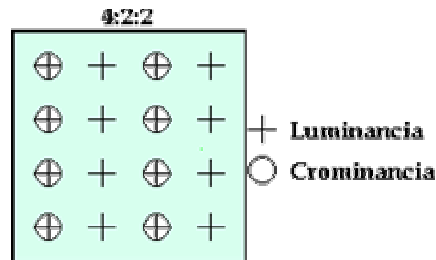


Figura 49. Posición de los muestreos en el formato 4:2:2

Para esta frecuencia de muestreo, el número de muestras por línea es de 864 y 858 para la luminancia y de 432 y 429 para las diferencias de color (sistema de 625 y 525 líneas respectivamente).

La estructura de muestreo es ortogonal, consecuencia de que la frecuencia de muestreo es un múltiplo entero de la frecuencia de líneas.

Las muestras de las señales diferencias de color se hacen coincidir con las muestras impares de la luminancia, o sea 1ª, 3ª, 5ª, etc.

El número de bits/muestra es de 8, tanto para la luminancia como para las señales diferencias de color, lo que corresponde a 2^8 niveles = 256 niveles de cuantificación.

La luminancia utiliza 220 niveles a partir del 16 que corresponde al nivel de negro, hasta el 235 correspondiente al nivel de blanco. Se acepta una pequeña reserva del 10% para la eventualidad de que ocurran sobremodulaciones. Ver la Figura 50.

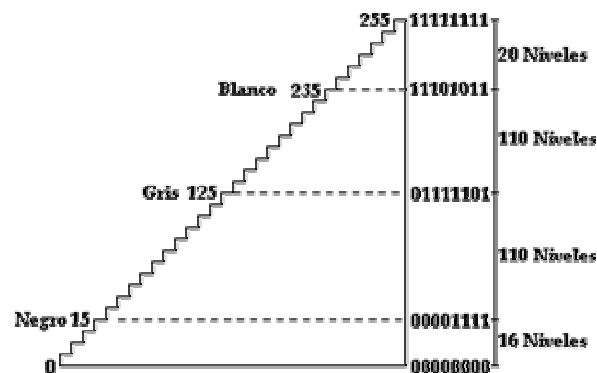


Figura 50. Cuantificación de la señal de luminancia

Para las señales diferencias de color se utilizan 224 niveles, que se reparten a ambos lados del cero análogo, que se hace corresponder con el número digital 128. Así pues, la señal variará entre los valores extremos $128 + 112 = 240$ y $128 - 112 = 16$, con una reserva de 16 niveles a ambos lados. Ver la Figura 51.

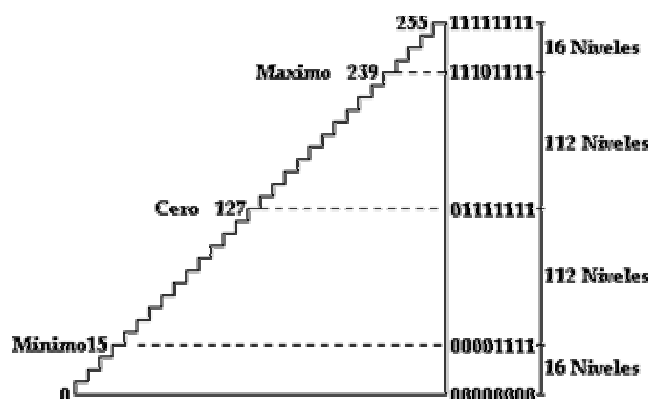


Figura 51. Cuantificación de la señal de crominancia

Dado que las señales Cr y Cb están disponibles simultáneamente en cada línea, la definición vertical es idéntica tanto para luminancia como para crominancia, y se corresponde con el número de líneas útiles del estándar de exploración de partida (480 para los estándar de 525 líneas, 576 para los de 625 líneas).

El flujo bruto resultante es:

$$(13.5 \times 8) + (2 \times 6.75 \times 8) = 216 \text{ Mbit/s (270 Mbit/s con 10 bits)}$$

Además, la digitalización de la parte útil de la señal de video solo requiere 166 Mbit/s, si se tiene en cuenta la inutilidad de digitalizar los intervalos de supresión del haz (también llamados "blanking") de línea y campo. Por tanto, estos tiempos libres pueden aprovecharse para transportar los canales de sonido digital, así como datos de servicio u otros.

A continuación se reproduce la norma 4:2:2 CCIR 601 en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Parámetros de la norma 4:2:2

Parámetros	Sistemas	
	NTSC	PAL/SECAM
	525 líneas	625 líneas
	60 campos	50 campos
1. Señales codificadas	Y, Cr, Cb	
2. Número de muestras por línea completa		
• Luminancia	858	864
• Crominancia	429	432

3. Estructura de muestreo	Ortogonal, estructura idéntica de todos los campos y cuadros. Las señales Cr y Cb se muestran simultáneamente con las muestras impares de la luminancia (1, 3, 5, etc.)
4. Frecuencia de muestreo <ul style="list-style-type: none"> Luminancia Crominancia 	13.5 MHz 6.75 MHz
5. Codificación	Cuantificación lineal. Codificación con 8 bits por muestra para la luminancia y cada señal de crominancia.
6. Número de muestras activas por líneas digital: <ul style="list-style-type: none"> Luminancia Crominancia 	720 360
7. Correspondencia entre los niveles de video y de cuantificación: <ul style="list-style-type: none"> Luminancia Crominancia 	220 niveles de cuantificación. El nivel negro corresponde al número digital 16; el nivel nominal de blanco al número 235. 224 niveles de cuantificación en la parte central del margen de cuantificación. El nivel de video cero corresponde al número 128.

2.5 Ventajas del video digital.

La calidad de reproducción de un sistema digital de video bien diseñado es independiente del medio y depende únicamente de la calidad de los procesos de conversión.

Cuando se copia una grabación digital, aparecen los mismos números en la copia: no se trata de un duplicado, sino de una clonación. Si no es posible distinguir la copia del original, no se habrá producido ninguna pérdida en la generación. Las grabaciones digitales pueden copiarse indefinidamente sin que haya pérdida en la calidad.

Una de las mayores ventajas que presenta la tecnología digital es su bajo costo. Si la realización de copias no ocasiona pérdidas de calidad, los equipos de grabación no tienen por qué ser mejor de lo necesario. No hay necesidad del consumo de cinta tan grande y

excesivo que tienen los equipos de grabación analógicos. Cuando la información que se ha de grabar adopta la forma de números discretos, estos pueden empaquetarse densamente en un soporte sin pérdida de la calidad. De darse el caso que algunos bits estén defectuosos por causa del ruido o de pérdidas de señal, el sistema de corrección de errores puede restituir el valor original.

Las redes de comunicaciones desarrolladas para manejar datos pueden llevar perfectamente video digital acompañado también de audio a distancias indefinidas sin pérdidas de calidad. La difusión de televisión digital emplea estas técnicas para eliminar las interferencias, así como los problemas de atenuación de señales y de recepción de camino múltiple propio de las emisiones analógicas. Al mismo tiempo, se hace un uso más eficaz del ancho de banda disponible.

Los equipos digitales pueden llevar incorporados equipos de autodiagnóstico. El costo de mantenimiento se reduce.

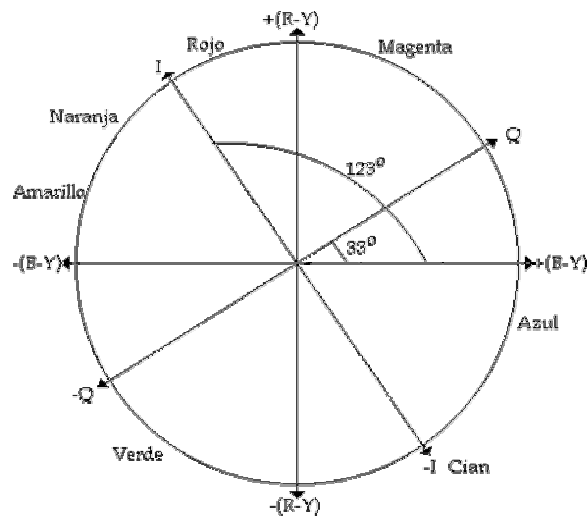


Figura 32. Representación de los colores en NTSC

Así se consigue que los sistemas de color y monocromáticos sean completamente compatibles.