

Visión Artificial

Tema 3. Captura y digitalización de señales

Índice

Esquema

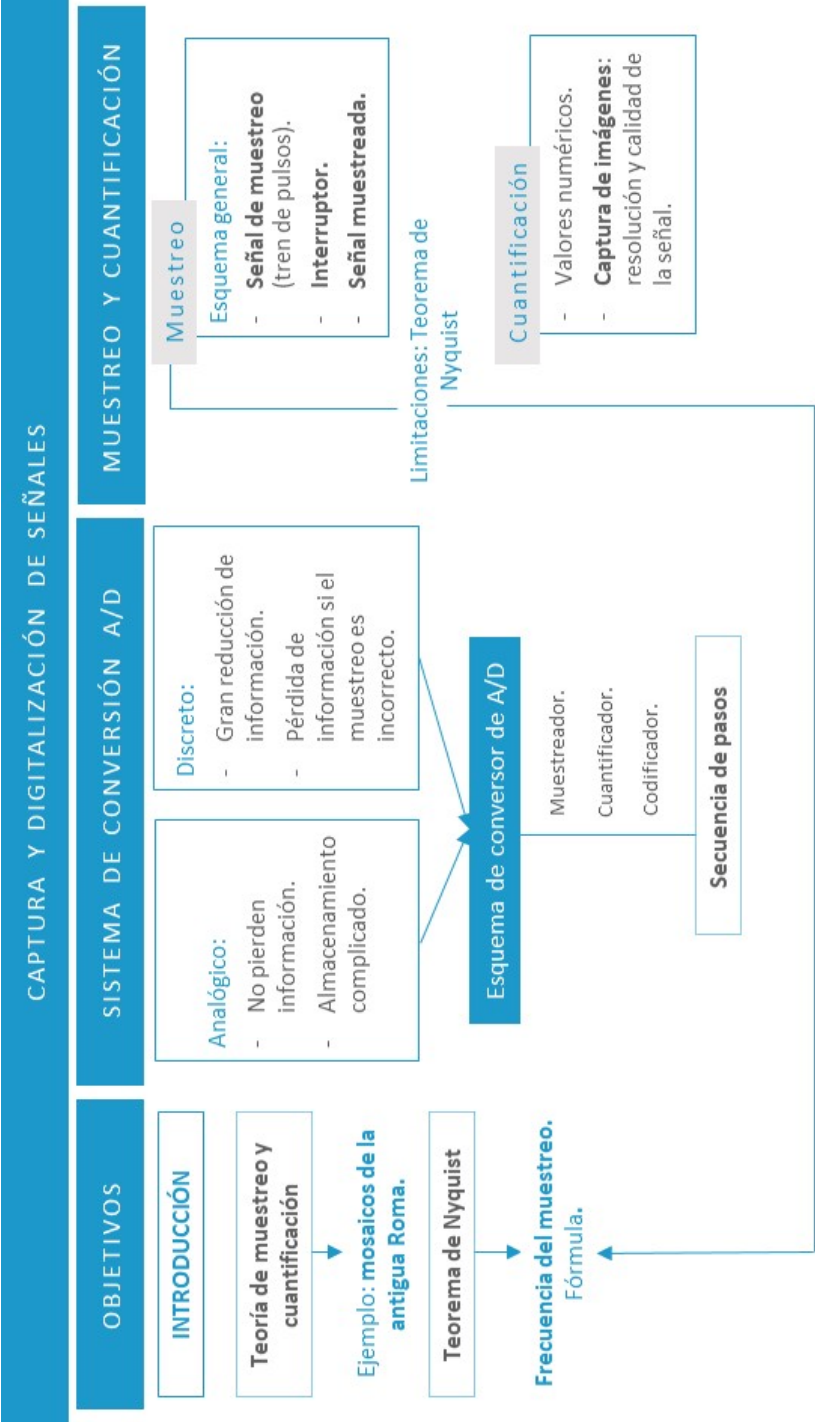
Ideas clave

- 3.1. ¿Cómo estudiar este tema?
- 3.2. Objetivos
- 3.3. Introducción
- 3.4. Sistemas de conversión analógico-discreto
- 3.5. Muestreo y cuantificación

A fondo

- Introducción al muestreo de señales (I)
- Introducción al muestreo de señales (II)
- Introducción al muestreo de señales (III)
- Introducción al muestreo de señales (IV)
- Bibliografía

Test



3.1. ¿Cómo estudiar este tema?

Para estudiar este tema deberás leer con atención las ideas clave que se desarrollan a continuación.

3.2. Objetivos

El muestreo de señales es una parte esencial en la captura de información. En él se basa el resto de procesamiento y la información que se pierda en esta fase no podrá estar disponible.

Es por eso que este tema pretende proporcionar las bases para entender correctamente el funcionamiento del muestreo y la posterior cuantificación de señales.

3.3. Introducción

La teoría de muestreo y cuantificación es uno de los temas más áridos en toda asignatura de procesamiento de señales. Reflejar sobre el papel que significa muestrear una señal requiere de una complejidad matemática muy alta.

Sin embargo, la mejor manera de entenderlo es verlo con un ejemplo, y para ello recurrimos a la cuantificación más antigua que se conoce: los mosaicos de la antigua Roma.



Figura 1. Ejemplo de discretización o cuantificación: detalle del mosaico de Medusa y las estaciones.

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mosaico_Medusa_-_Museo_Arqueologico_Nacional_-_Madrid.jpg

El ejercicio de crear un mosaico es claro: con un conjunto «limitado» de colores (como mucho entre cien o doscientos colores) que se corresponden con diferentes tipos de piedra, elaborar un dibujo que refleje la complejidad de la realidad como las sombras, claroscuros, tonalidad, movimiento e incluso la expresión.

Intuitivamente podemos llegar a comprender que cuanto mayor sea el número de **colores** disponibles, mayor la gama cromática que podemos alcanzar y, por lo tanto, mayor el número de matices y expresiones o detalles que se pueden mostrar. Lo mismo sucede con el **tamaño** de la tesela. Parece intuitivo pensar que cuanto más pequeña sea la tesela, mejor nos aproximaremos a la realidad.

Pero si tuviésemos que hacerlo ahora, ¿qué cantidad de colores elegirías?, ¿qué tamaño de tesela?, ¿serían todas del mismo tamaño?, ¿cuál sería el mínimo número de colores y cuál el tamaño de la tesela para que el mosaico fuera lo más barato y bello a la vez? Estas preguntas no son tan obvias de responder. Y los romanos seguro que tampoco tenían las respuestas.

La teoría de muestreo y cuantificación nos ayuda a decidir esos mínimos valores.

Nos da los umbrales a partir de los cuales podemos tener una calidad suficiente de señal o de imagen, sin necesidad de emplear mucho almacenamiento (teselas en el ejemplo del mosaico romano).

Dicha teoría de muestreo funciona de la siguiente manera: imaginemos que queremos entender el funcionamiento de la noche y el día. Vamos a asumir que tenemos siempre los ojos cerrados y que los abrimos en un momento concreto. En este ejercicio, abrir los ojos es una metáfora para **muestrear una realidad**; en definitiva, no es más que observar.

Pongamos que la **primera muestra**, la primera vez que abrimos los ojos, es de día. Si abrimos los ojos una vez al mes, siempre a la misma hora, solo veremos que es de día pudiendo llegar a la conclusión de que en nuestro planeta solo está el día y no hay noche.

Como sabemos teoría de muestreo, decidimos acelerar la **frecuencia de muestreo** a una vez al día, cada 24h. Lamentablemente observamos el mismo efecto: es de día. Decidimos hacer el experimento cada hora y vemos cada día doce muestras de luz y doce muestras de oscuridad (asumiendo que el día y la noche tienen igual número de horas). Evidentemente, con este muestreo se ha observado el fenómeno de la noche. Lo mismo hubiera pasado si miro cada segundo, evidentemente.

Luego, hasta este punto tenemos que si se observa:

- ▶ Cada 24h, siempre hay luz.
- ▶ Cada hora, hay doce observaciones de luz y doce de oscuridad.

Si ahora realizamos el experimento midiendo cada doce horas, realizaremos dos medidas al día: una de noche y una de día. Hemos dado con la **frecuencia mínima**, también llamada frecuencia de muestreo, para observar el fenómeno de la noche y el día. Parece casualidad que:

La **frecuencia del fenómeno** sea una vez cada 24 horas, es decir, la secuencia luz-noche se repite a las 24h, mientras que la **frecuencia mínima** para observar el fenómeno es justo el doble, una vez cada 12h.

Sería aventurarse mucho decir que:

$$f_{\text{muestreo}} > 2f_{\text{observación}}$$

Esta igualdad se conoce como **Teorema de Nyquist-Shannon**, a dicha frecuencia de muestreo se la denomina también **Frecuencia de Nyquist** y es la idea principal sobre la que trata este tema. En otras palabras, para procesar información digital hay que perder calidad de la señal e información. La cuestión es, ¿cuál es la mínima información que puedo perder?

3.4. Sistemas de conversión analógico-discreto

En esta sección contaremos en qué consiste un conversor analógico-discreto más en detalle, así como su utilidad y funcionamiento. Antes de nada, es importante entender dos conceptos: analógico y discreto.

Analógico

Por analógico se entiende toda señal o imagen que es continua y que procede de una fuente o fenómeno físicos como puede ser un sonido, un objeto en movimiento, etc. Si continuamos con el ejemplo anterior del mosaico, lo analógico sería el dibujo original del que partió el artista que diseñó el mosaico.

- ▶ Este tipo de señales se caracterizan por tener todo el detalle de la realidad, **no pierden nada de información** cuando se transmiten de un punto a otro.
- ▶ El almacenamiento de una señal analógica es complicado y muy poco eficiente (sirva como ejemplo los discos de vinilo o los *cassettes* antiguos).

Discreto

Por discreto (también digital, son sinónimos en este contexto) se entiende una señal o imagen que **solo puede alcanzar unos determinados valores**, por lo que está discretizada. Normalmente, una señal discreta/digital viene de muestrear y discretizar la señal analógica.

- ▶ La mayor ventaja es la reducción de información que supone.
- ▶ La desventaja, si el muestreo no se realiza correctamente, puede ser que la señal pierda la información más importante.

Esquema de un conversor A/D

A continuación se presenta un esquema general de un conversor A/D. Este conversor consta de las siguientes partes:

- ▶ En primer lugar, el **muestreador**, que es el encargado de convertir la señal analógica a discreto tomando fotos de la señal a una frecuencia determinada.
- ▶ En segundo lugar, un **cuantificador**, encargado de transformar la foto tomada en el muestreo y convertirla en un conjunto limitado de valores.
- ▶ Finalmente, un **codificador** que convierte el valor del cuantificador en binario o en un sistema numérico que pueda transmitirse.

En algunos ejemplos de la literatura, cuantificador y codificador van de la mano y suelen ser una misma pieza. No obstante, pueden separarse con vistas a que se apliquen diferentes tipos de codificación (junto con su redundancia para evitar errores).

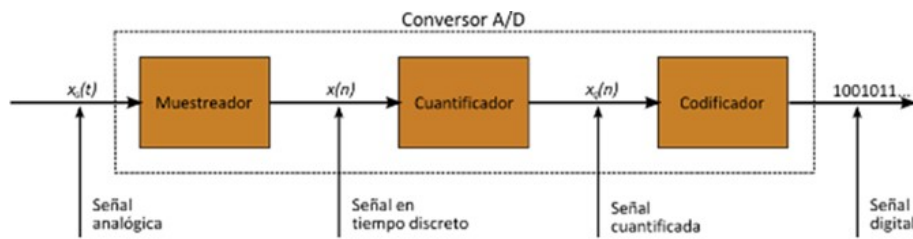


Figura 2. Esquema general de un convertor analógico-discreto. Fuente:

<https://soundgirls.org/tag/entendiendo-los-convertidores-ad-da>

Las ventajas principales de hacer este proceso son las siguientes:

- ▶ Permite, en primer lugar, reducir la complejidad de la señal de entrada y reducirla únicamente a un determinado número de posibilidades (**cuantificador**).
- ▶ El filtrado de ruidos, anomalías y otros efectos producidos por una baja calidad son mucho más fácilmente procesables con un filtrado digital que con un filtrado analógico.
- ▶ Los filtros digitales pueden modificarse mediante software, a diferencia de los analógicos, que deben modificarse por hardware, lo que los encarece y hace difícil su mantenimiento.
- ▶ La señal analógica, por el mero hecho de ser convertida a señal digital, ya reduce la cantidad de información a procesar posteriormente, pero otra característica es que dicha señal digital puede comprimirse y encriptarse.
- ▶ El almacenamiento de una señal digital es más sencillo y barato que el almacenamiento analógico, así como más perdurable en el tiempo.

Sin embargo, las señales digitales (un archivo MP3 por ejemplo) no pueden oírse directamente, lo único que pueden oírse son las señales analógicas. El proceso de

conversión de analógico a digital o discreto debe permitir el proceso inverso, asumiendo que por la propia definición de este proceso se perderá información, pero la mínima como para que la señal analógica reconstruida suene muy similar a la original.

Para ello, deben seguirse los siguientes pasos que se presentan a continuación:

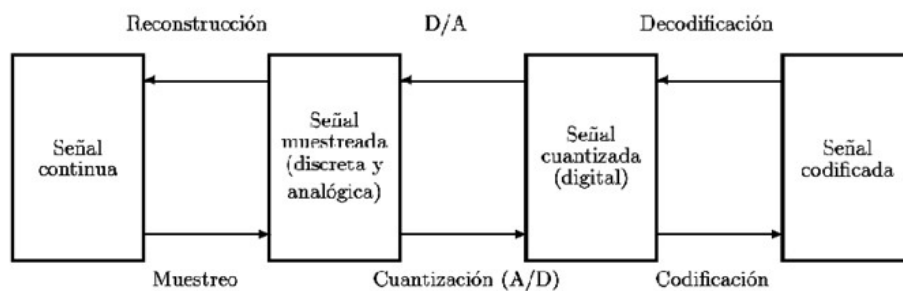


Figura 3. Reconstrucción de una señal analógica. Fuente: <http://www.lip.uns.edu.ar/pdi/index31.htm>

En este tema solo veremos el proceso de conversión A/D. El proceso inverso, (conversión D/A), aunque similar en estructura y pasos a dar, contiene otras peculiaridades que se desvían del objetivo de esta asignatura.

Para entender el diagrama anterior, vamos a explicarlo con un ejemplo: vamos a un concierto de nuestro cantante favorito y nos llevamos nuestro móvil. En el momento en que suena nuestra canción favorita, sacamos el móvil y grabamos, ¿qué sucede en ese instante?

- ▶ Primero, el micrófono del móvil captura toda la información analógica proveniente del exterior (no solo la voz del cantante, sino también el ruido de ambiente).
- ▶ Dicho micrófono, aunque puede capturar toda la información, lleva asociado un sistema de muestreo que «observa» la señal de forma periódica, es decir, mide la intensidad de voz cada cierto periodo de tiempo.

- La señal, una vez muestreada y cuantificada, ya puede almacenarse en el dispositivo móvil. Es la única manera de almacenar información en un dispositivo de este tipo.

A continuación puede verse un esquema de los pasos seguidos para guardar un sonido de voz en un dispositivo móvil:

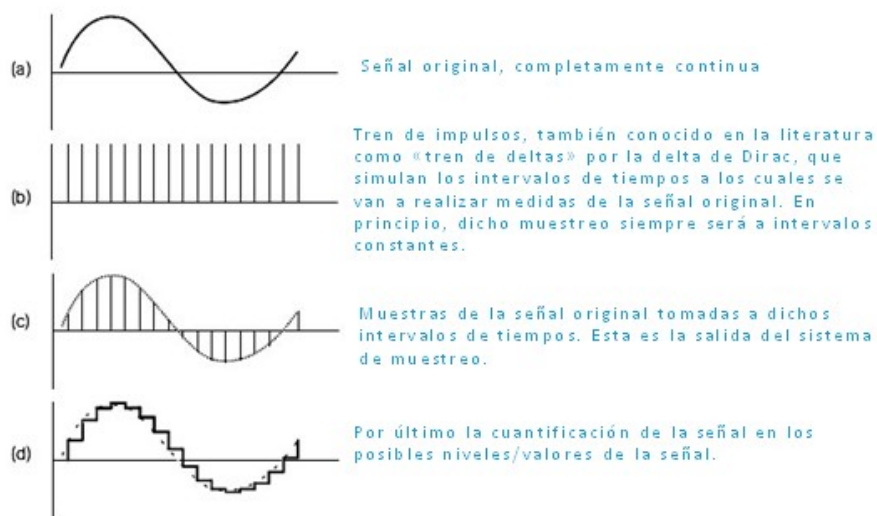
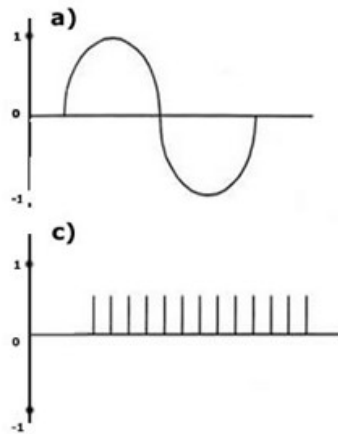


Figura 4. Secuencia de pasos para la conversión analógico-discreto. Fuente: Adaptado de

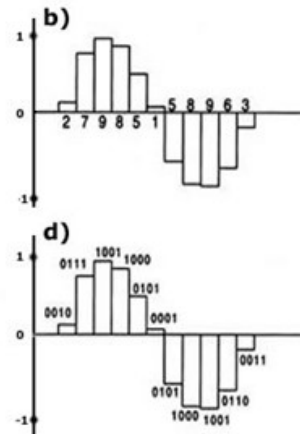
<https://es.slideshare.net/slideshow/unidad-1-control2/25029735>

Señal original.



Señal discretizada incluyendo los valores discretos asignados a cada muestra.

Tren de impulsos que simulan los intervalos de tiempos a los que la señal se muestrea.



Conversión de dichos valores a binario (o cualquier otro formato digital).

Figura 5. Secuencia para la conversión analógico-discreto incluyendo también la digitalización de la señal.

Fuente: Adaptado de https://www.researchgate.net/figure/muestreo-cuantificacion-y-codificacion-34_fig4_376582093

34_fig4_376582093

3.5. Muestreo y cuantificación

En el apartado anterior, se ha presentado una visión general de los sistemas de conversión analógico-discreto. Ahora, en este apartado, se describen los componentes individuales y la manera en la que se implementan.

Muestreo

Como hemos dicho antes, el muestreo consiste en tomar fotos de la realidad (ya sea una señal o una imagen) a una determinada frecuencia (posteriormente veremos qué criterio) de tal manera que la información manejada se reduce, pero no la información necesaria para comprender el mensaje.

A continuación se presenta un esquema general de muestreo. Dicho sistema consta de:

- ▶ Una señal de muestreo, conocida como **tren de pulsos**, que define la frecuencia y el tiempo de muestreo, es decir, durante cuánto tiempo se va a observar la señal.
- ▶ Un **interruptor** que, en función de la señal de muestreo, se abrirá o cerrará permitiendo tomar las fotos de la señal original.
- ▶ Por último, la **señal muestreada**.

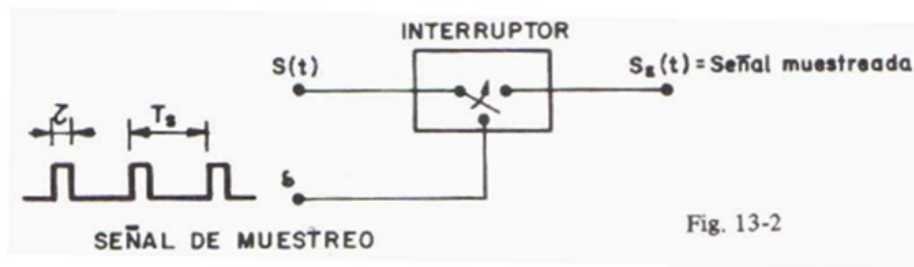


Figura 6. Sistema de muestreo basado en tren de pulsos. Fuente:

http://www.ifent.org/lecciones/digitales/secuenciales/teorema_muestreo.htm

El mecanismo es sencillo en su visión reducida, pero presenta ciertas **limitaciones**:

- ▶ El muestreo dependerá de la señal de muestreo, tanto de la anchura de los pulsos como de la separación entre ellos.
- ▶ El interruptor en sí mismo presenta discontinuidades muy pronunciadas cuando conmuta tan rápidamente. Esto puede ocasionar (y de hecho los produce) picos de señal en la señal muestreada.
- ▶ El conmutador puede estropearse debido al propio mecanismo y su uso continuado, cualquier solución que no involucre un sistema mecánico ofrecerá ventajas considerables. Es por ello que muchos muestreadores multiplican la señal por dicha señal de muestreo.

Ahora bien, de todos estos parámetros anteriores, solo hay uno que sí
que puede modificarse: la frecuencia de muestreo.

Dicha frecuencia viene definida por el **teorema de Nyquist-Shannon** (profundizaremos más sobre esto en la lección magistral de este tema) que indica que si una señal tiene un ancho de banda f , la frecuencia de muestreo deberá de ser:

$$f_{\text{muestreo}} > 2f$$

Sin embargo, existen dos aspectos importantes a tener en cuenta si no se cumple dicho teorema.

¿Qué sucede si muestreo por debajo de la frecuencia de Nyquist?

Lo que sucederá es lo que se ve en la siguiente imagen. Partiendo de la señal sinusoidal original, si se muestrea a menor frecuencia se verá por tanto una variación de señal que no corresponde con la verdadera. Es decir, veremos que la señal va más despacio.

Este efecto sucede cuando vemos un coche en marcha y sus ruedas parecen girar en el sentido contrario de la marcha.

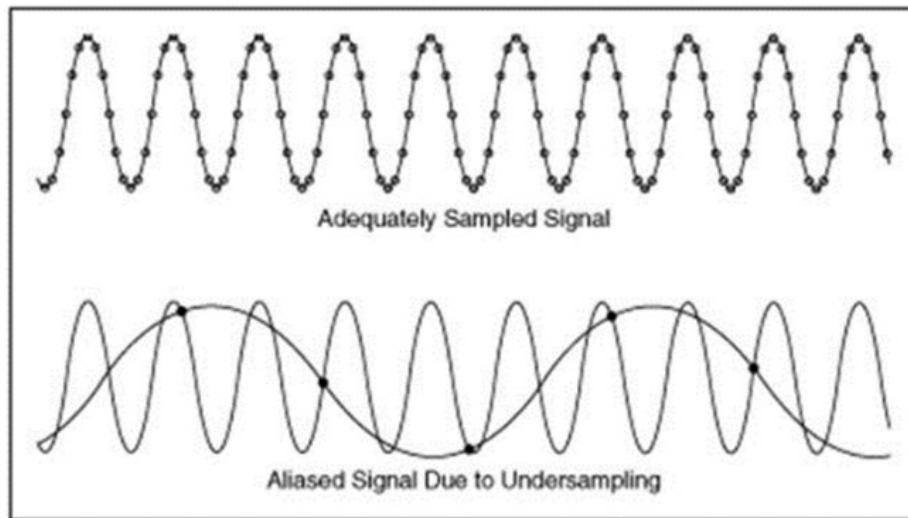


Figura 7. Ejemplo visual de submuestreo o undersampling. Fuente: https://www.researchgate.net/figure/f-the-sample-rate-is-too-low-higher-frequencies-can-be-identified-as-a-lower-ones-that_fig3_266874390

¿Qué sucede si muestreamos a mucha más frecuencia?

Entonces, estaremos capturando información de más, lo que produce una reconstrucción errónea de la señal, tal y como se ve en la imagen siguiente. Es decir, consideramos puntos consecutivos, entre los cuales no hay apenas variación, como puntos que poseen una gran variabilidad.

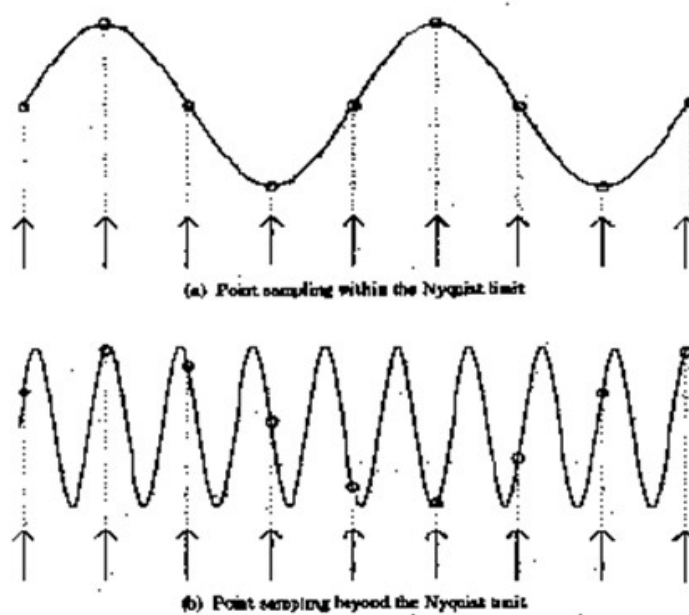


Figura 8. Ejemplo de sobremuestreo de señales u oversampling.

Cuantificación

La cuantificación es el proceso de convertir las muestras tomadas de la señal original en **valores numéricos**.

Dichos valores numéricos poseen una resolución que dependerá del número de bits con los que cuente el procesador. Como se aprecia en la imagen siguiente, a mayor número de bits, mayor parecido con la señal original.

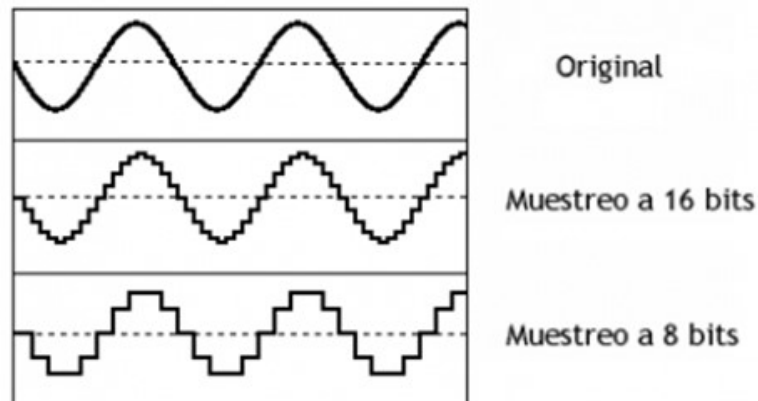


Figura 9. Ejemplo de cuantificación con diferentes niveles de calidad (bits). Fuente:

<https://sistemasdecomunicacion-gt.blogspot.com/2017/02/teorema-de-muestreo-nyquist-shannon.html>

En general, los sistemas de cuantificación proporcionan una **cuantificación uniforme**, pero en determinados casos, donde la riqueza de valores es más amplia, suele aumentarse el número de valores en una determinada región de la señal para que así se puede alcanzar mayor resolución donde más se necesita.

La elección del número de bits, así como de la uniformidad del rango es algo que depende de la aplicación y, al contrario del teorema de Nyquist, no existe un teorema concreto que definan ambos parámetros simultáneamente. Es cierto que el teorema de Shannon sí que da una idea de cuántos números de bits harían falta para codificar una determinada señal. Esto lo veremos en detalle en la sesión magistral.

Esta cuantificación realmente está implícita en la propia captura de imágenes. Por ejemplo, las cámaras CCD (ver imagen a continuación) poseen un cuantificador por fotodiodo, con lo cual una imagen nunca es continua, ya es discreta de por sí, y lo mismo sucede con las señales digitales.

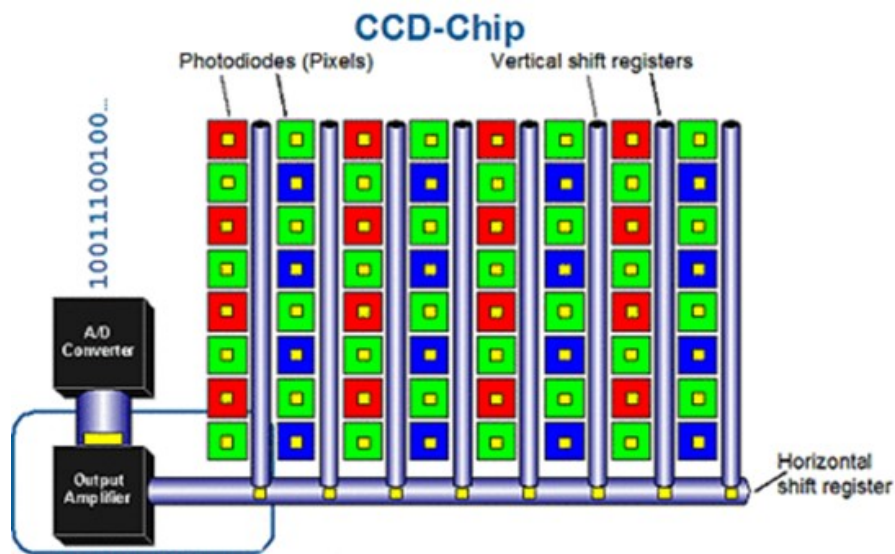


Figura 10. Esquema de funcionamiento de captura de imágenes basada en CCD. Fuente: <https://www.evosecurity.com.co/uncategorized/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos/>

La cuantificación puede verse como un tema de **resolución o calidad de la señal**. De hecho, en función del número de bits empleados para cuantificar una señal, así será su propia calidad. Normalmente, en imagen, se trabaja con 256 niveles de color, siendo 0 el color negro y 255 el color blanco en escala de grises.

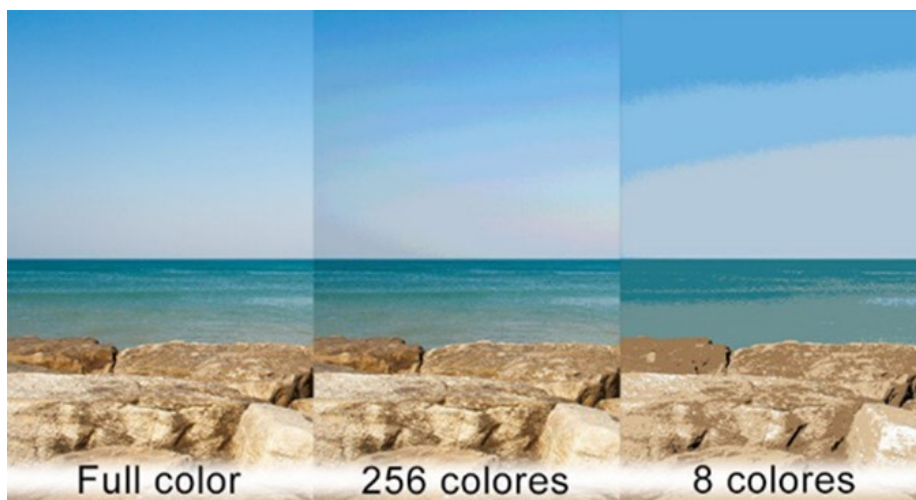


Figura 11. Cuantificación con diferentes niveles de resolución: Full color, 256 colores, 8 colores. Fuente: <https://apuntesderamon.wordpress.com/ofimatica/tema-9-imagen-digital/1-pixeles-y-resolucion/>

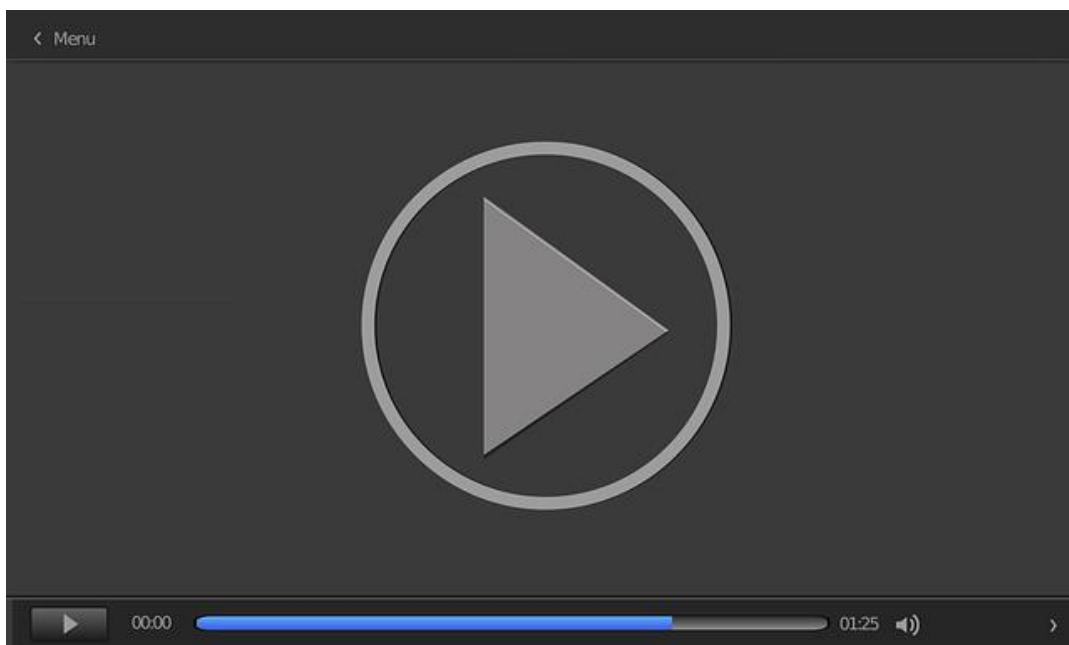
Así como el muestreo puede volver a recomponerse, siempre y cuando se cumpla el teorema de Nyquist (como veremos en la clase magistral), la información difícilmente puede recuperarse en el caso de la resolución baja. Existen algunos algoritmos, basados en la transformada del Coseno, similar a la transformada de Fourier, pero que su funcionalidad se basa en inferir qué rango de valores posibles podrían haber tomado antes de la cuantificación.

Por último, podemos indicar que hoy día muestreo y cuantificación están tan relacionados que se vinculan incluso a nivel hardware y de dispositivo.

Introducción al muestreo de señales (I)

Carlos Zepita. (2015, octubre 22). *Introducción al Muestreo (1/4)* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=PEXAM2AAyB4>

Primer vídeo de una serie de cuatro en el que se explica: conversor análogo-digital y muestreo en el dominio del tiempo y la frecuencia.



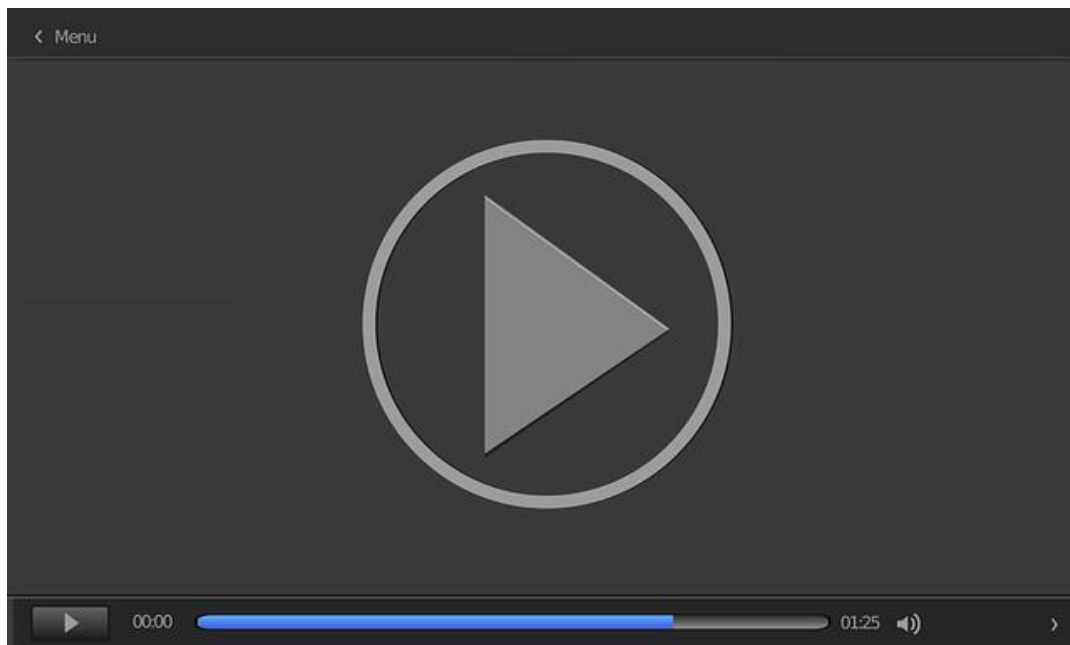
Accede al vídeo:

<https://www.youtube.com/embed/PEXAM2AAyB4>

Introducción al muestreo de señales (II)

Carlos Zepita. (2015, octubre 22). *Introducción al Muestreo (2/4)* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=1YRXc14E7b8>

Segundo vídeo de una serie de cuatro en el que se explica el conversor análogo-digital y muestreo en el dominio del tiempo y la frecuencia. En este caso mediante un ejercicio de diseño de un sistema de muestreo.



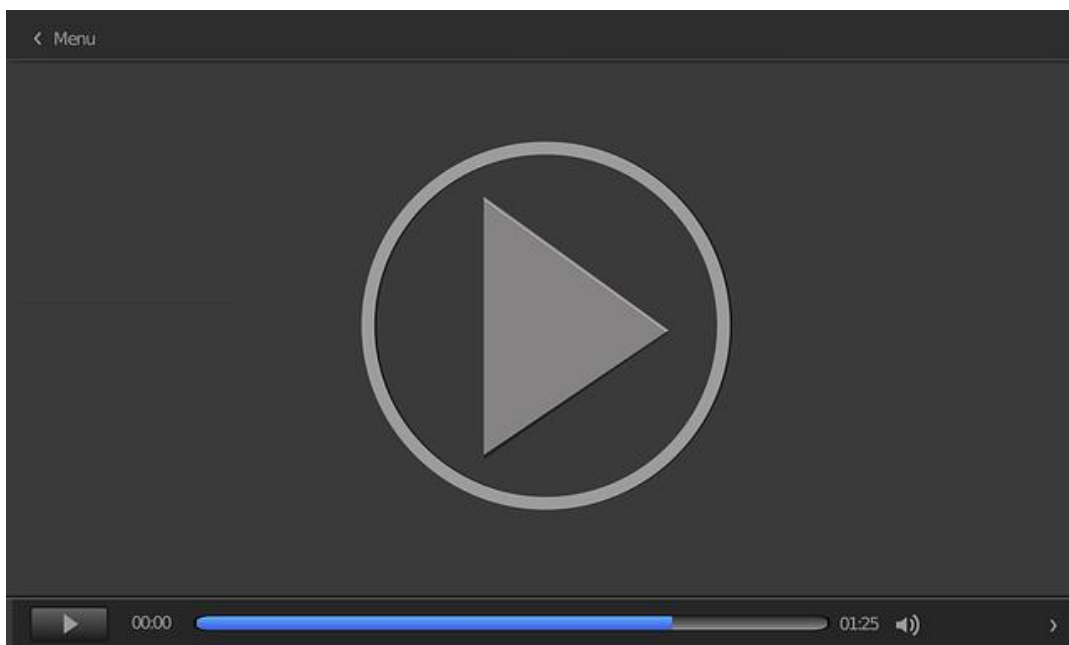
Accede al vídeo:

<https://www.youtube.com/embed/1YRXc14E7b8>

Introducción al muestreo de señales (III)

Carlos Zepita. (2015, octubre 22). *Introducción al Muestreo (3/4)* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=2naptDOCeBg>

Tercer vídeo de una serie de cuatro. En esta ocasión se aborda el proceso de reconstrucción.



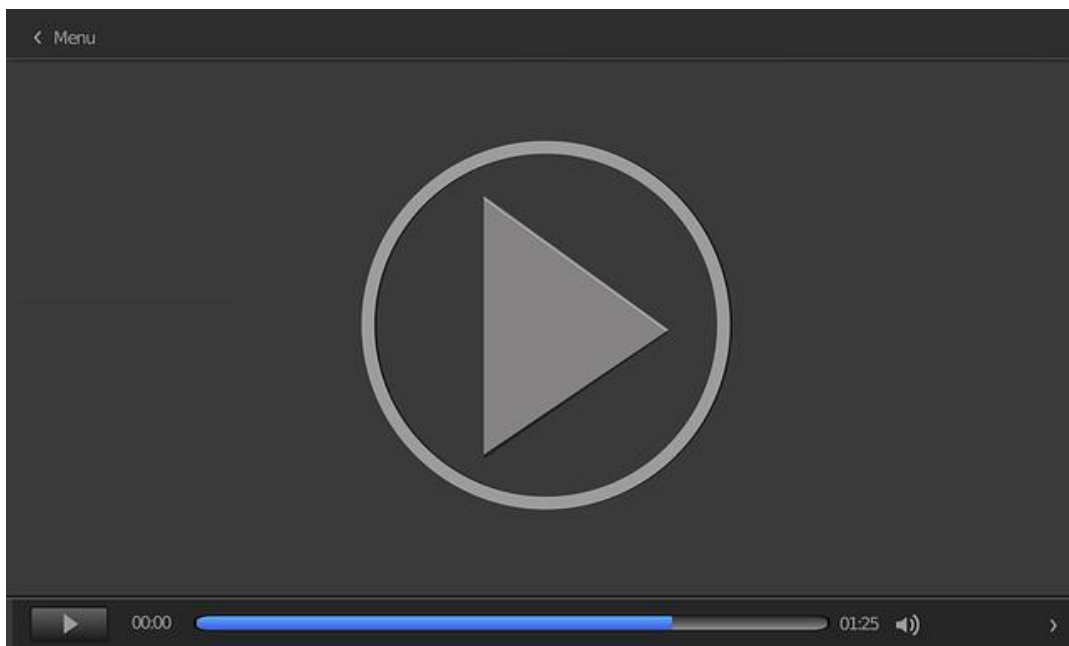
Accede al vídeo:

<https://www.youtube.com/embed/2naptDOCeBg>

Introducción al muestreo de señales (IV)

Carlos Zepita. (2015, octubre 22). *Introducción al Muestreo (3/4)* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=pSPK09s8hc8>

Cuarto y último vídeo de una serie de cuatro. Termina esta serie con una explicación sobre *aliasing* o enmascaramiento en el que se incluye un ejemplo en el que se analiza la respuesta en frecuencia de muestrear una señal.



Accede al vídeo:

<https://www.youtube.com/embed/pSPK09s8hc8>

Bibliografía

Oppenheim, A. V. y Schafer, R. W. (2009). *Discrete-Time Signal Processing*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc.

1. El teorema de Nyquist proporciona una medida del ancho de banda de una señal:
 - A. Verdadero
 - B. Falso.

2. El muestreo de señales permite:
 - A. Reducir la información a procesar.
 - B. Tomar fotos de una determinada señal continua.
 - C. Acelerar los procesamientos posteriores de señal.
 - D. Todas las anteriores.
 - E. Solo A y B son correctas.

3. Una señal constante, como pueda ser la de una pila de batería, no se puede muestrear:
 - A. Sí, todas las señales se pueden muestrear.
 - B. Solo si su ancho de banda es el doble de si no fuese constante
 - C. No se puede muestrear.

4. Ordene los elementos de un conversor analógico-discreto por orden de procesamiento:
 - A. Muestreo, cuantificación y codificador.
 - B. Cuantificador y muestreo. El codificador es opcional.
 - C. Codificador, muestreo y cuantificación.

5. El sobremuestreo consiste en:
 - A. Muestrear con una frecuencia más elevada que la de Nyquist.
 - B. Cuantificar con más valores de los necesarios.
 - C. Dependerá de la codificación, pero principalmente consiste en usar una frecuencia más baja que Nyquist.

6. ¿Una señal que ha pasado a través de un conversor analógico-discreto puede volver a recuperarse completamente?
- A. Sí, en cualquier caso.
 - B. Sí, siempre que se haya respetado el teorema de Nyquist.
 - C. Nunca.
7. La voz humana tiene un ancho de banda de 4 KHz, ¿a qué frecuencia debe de muestrearse toda señal de voz?
- A. Una señal de voz que tiene ancho de banda ya está digitalizada.
 - B. Según Nyquist a 8 KHz mínimo.
 - C. Según Nyquist como máximo 2 KHz.
8. Sin el muestreo y la cuantificación no podrían hacerse filtros de señal:
- A. Verdadero, sin ellos el filtrado carece de sentido
 - B. Falso, las señales analógicas pueden filtrarse mediante filtros analógicos.
 - C. Falso, se puede seguir usando tecnología digital. El problema sería que la información a procesar será enorme.
9. Un alumno decide poner una cámara a las ruedas de su coche. La rueda gira a una frecuencia de cuatro vueltas por segundo, es decir, cada vuelta tarda 250 milisegundos, ¿a qué frecuencia gira?
- A. Frecuencia = 250 Hz.
 - B. Frecuencia = 4 Hz.
 - C. Frecuencia = 2 KHz.

10. Si tuvieras que usar un algoritmo de compresión, ¿en qué momento del conversor A/D lo emplearías?
- A. Después del muestreo, justo antes de la cuantificación. Así ahorro niveles de cuantificación.
 - B. Después de la cuantificación y antes de la codificación.
 - C. Después de la codificación, ya que la información sale binaria de dicho módulo y es fácilmente comprimible.
 - D. En cualquiera de las fases.