

I. Temas a estudiar Sys:

1. Convolución discreta:

$$Y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot h[n-k]$$

La convolución me permite determinar la respuesta ($y[n]$) de un sistema ante cualquier señal de entrada ($x[k]$) siempre que se conozca la respuesta al impulso ($h[n]$). **Válido solo para sistemas LTI (lineales e invariantes en el tiempo).**

i. Dado el siguiente conjunto discreto:

$$x[n] = \{ 1, 2, -2, -1, 1 \}$$

Se puede expresar como ponderaciones de una señal impulso en cada valor, considerando cierto valor como 0 y el resto corrimientos del impulso.

$$x[n] = 1f[n+1] + 2f[n] - 2f[n-1] - 1f[n-2] + 1f[n-3]$$

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] f[n-k]$$

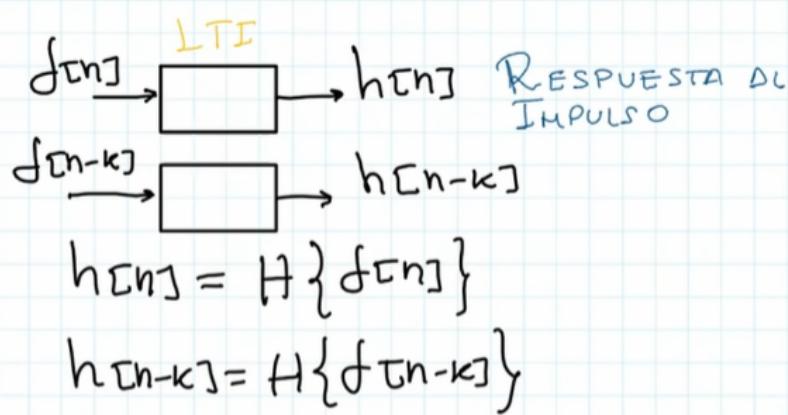
Visto como sistema, una señal de entrada $x[n]$ es sometida a la función del sistema H , obteniéndose $y[n]$ en la salida.

$$y[n] = H \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] f[n-k] \right\}$$

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} H \left\{ x[k] f[n-k] \right\}$$

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] H \left\{ f[n-k] \right\}$$

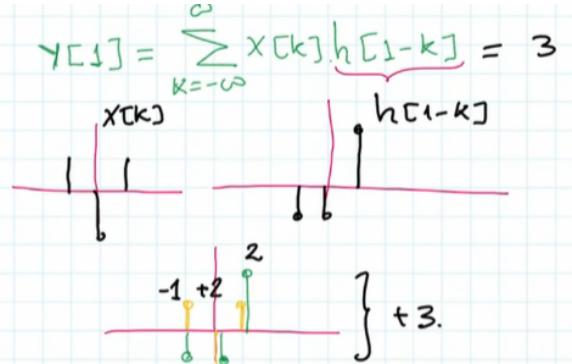
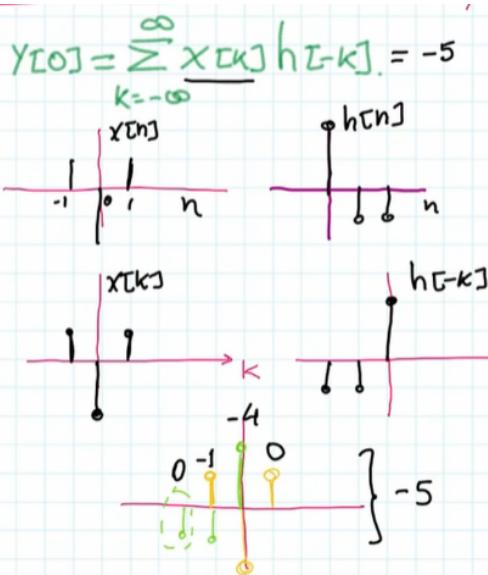
Luego, como $x[k]$ es constante la función del sistema se aplica sobre el impulso, obteniendo $h[n]$ como la respuesta al impulso.



Obteniendo la ecuación inicial de la convolución al reemplazar:

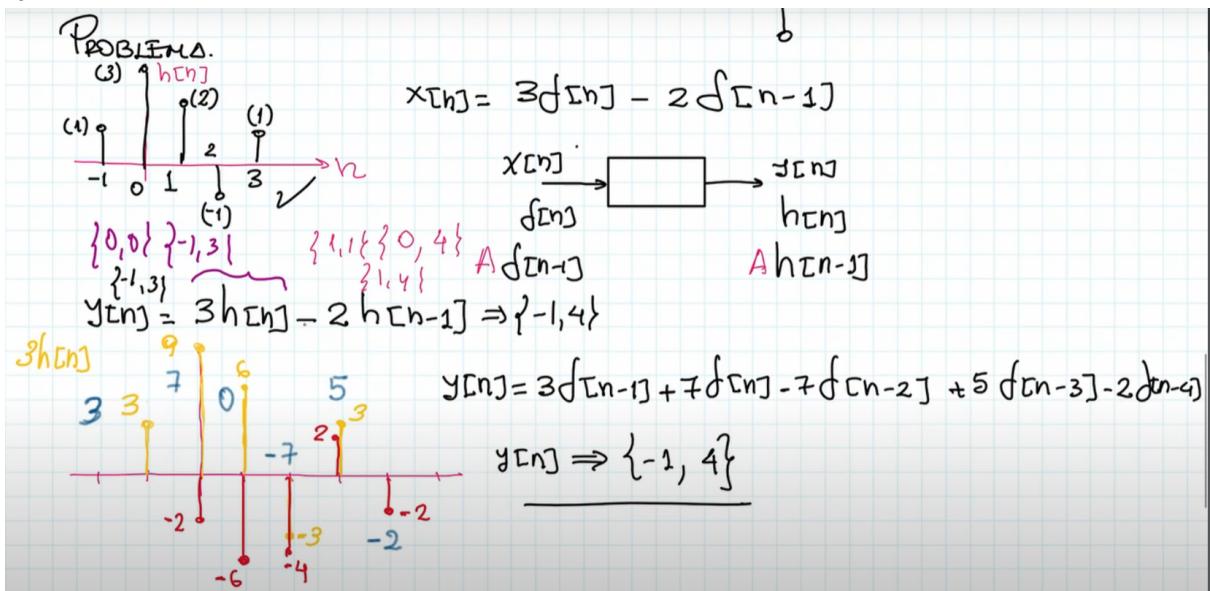
$$Y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot h[n-k]$$

Ej1:

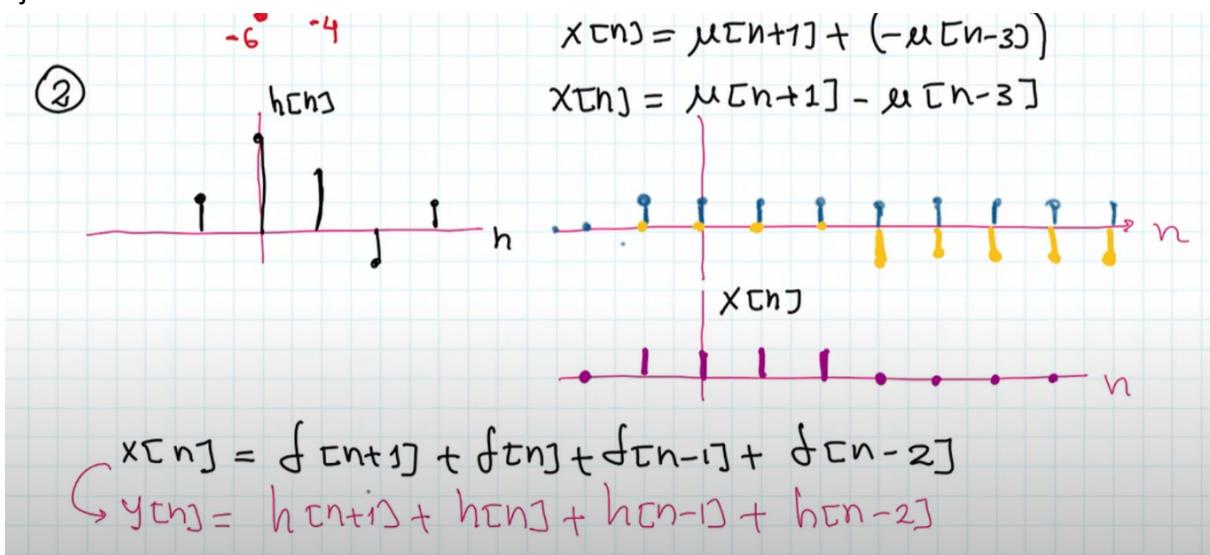


La dinámica consiste en ir iterando sobre la respuesta impulso (invertida, porque es $h[n-k]$) y obtener el valor de la intersección con $x[k]$ (producto de cada valor y posterior suma de los resultados).

Ej2:



Ej3:



2. Convolución continua:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) f(t-t_0) dt = x(t_0) \quad \xrightarrow{\text{EN GENERAL}} \quad \int_{-\infty}^{\infty} x(t) f(t-t_0) dt = x(t_0) f(t-t_0)$$

$$\left(\int_{-\infty}^{\infty} x(z) f(t-z) dz = x(t) \right) \quad \xrightarrow{\text{SUPERPOSICIÓN}} \quad \int_{-\infty}^{\infty} a f(t-t_0) dt = a.$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t_0) f(t-t_0) dt = x(t_0).$$

DISCRETA $\rightarrow \sum$
CONTINUA $\rightarrow \int$

Se trata de construir cualquier señal como una superposición de impulsos. La dinámica es similar al caso discreto, solo que en vez de sumatoria tenemos

integrales.

$$\begin{array}{c}
 \xrightarrow{\text{LTI}} \\
 \begin{array}{ccc}
 x(t) & \xrightarrow{\quad} & y(t) = H\{x(t)\} \\
 f(t) & \xrightarrow{\quad} & h(t) = H\{f(t)\} \\
 f(t-t_0) & \xrightarrow{\quad} & h(t-t_0) = H\{f(t-t_0)\}
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 y(t) &= H \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} x(z) f(t-z) dz \right\} \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} x(z) H\{f(t-z)\} dz \\
 \boxed{y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(z) h(t-z) dz} &\quad \boxed{\checkmark}
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \boxed{y(t) = x(t) \otimes h(t)}$$

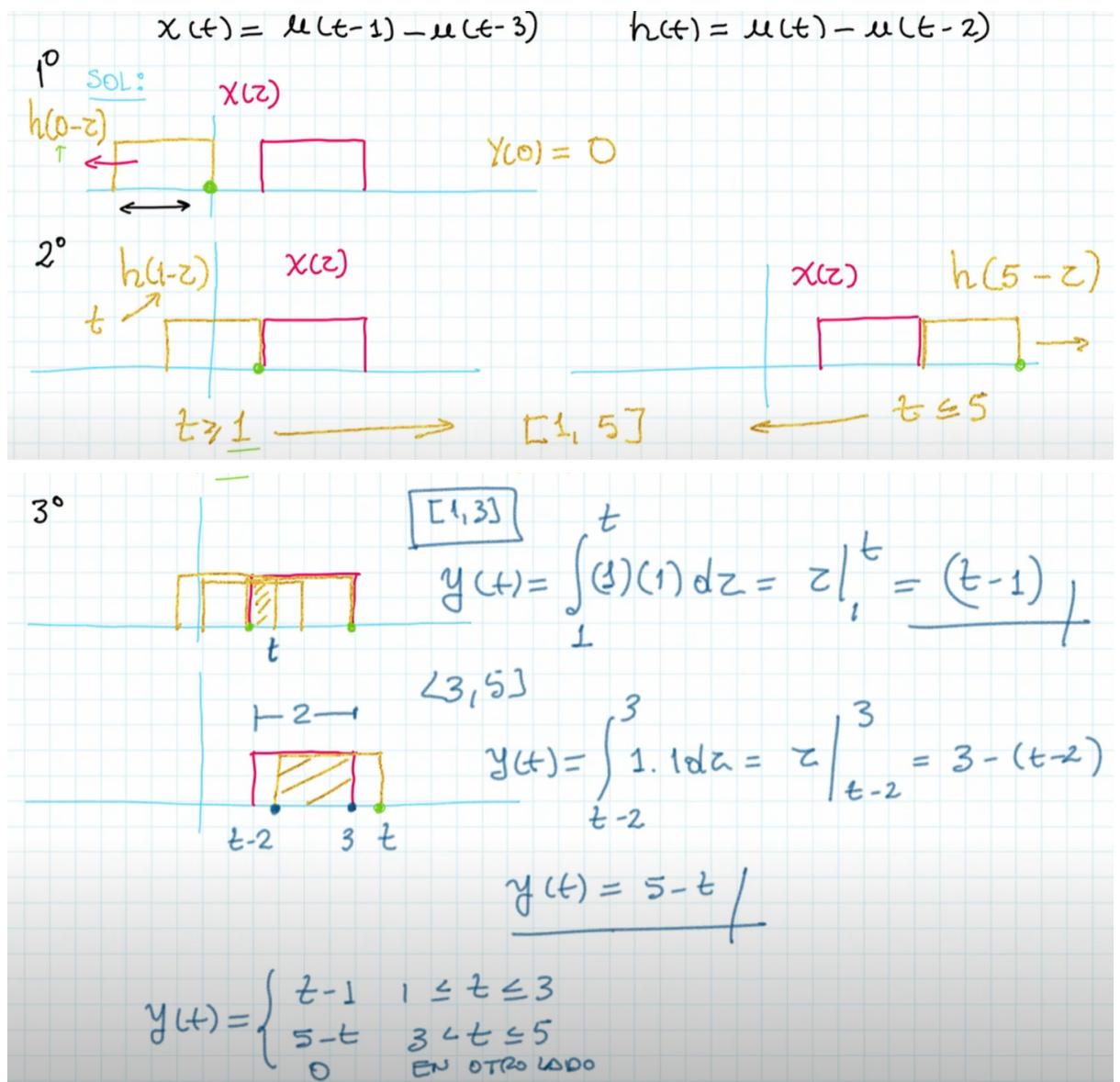
Ej1:

$$\begin{array}{l}
 \text{Ejemplo: } x(t) \otimes h(t) \\
 \begin{array}{l}
 \text{Graph: } f(t) \text{ (red), } g(t) \text{ (green)} \\
 \text{Definition: } y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z) \mu(z) g(t-z) \mu(t-z) dz
 \end{array}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \mu(z) = \begin{cases} 1 & z \geq 0 \\ 0 & z < 0 \end{cases} \quad \mu(t-z) = \begin{cases} 1 & z \leq t \\ 0 & z > t \end{cases}
 \end{array}$$

$$\boxed{y(t) = \int_0^t f(z) g(t-z) dz}$$

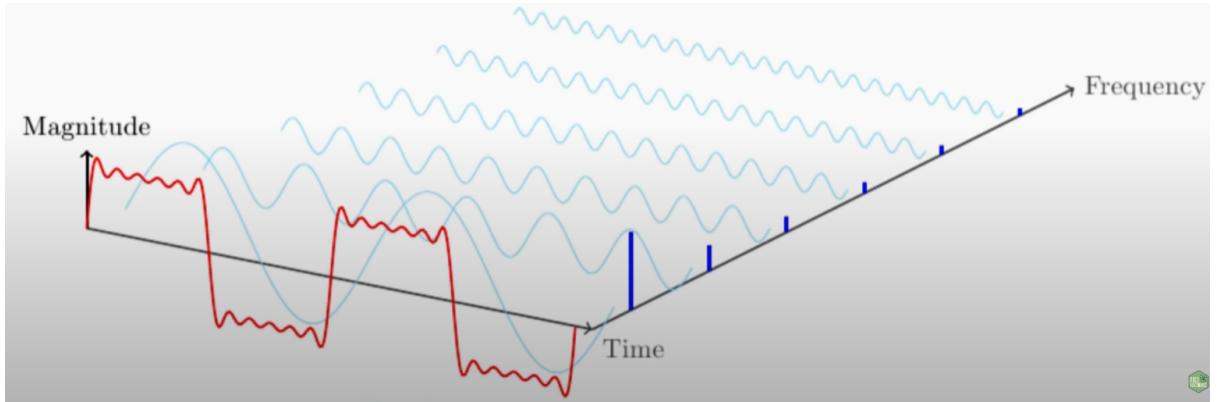
Ej2:



Observaciones convolución:

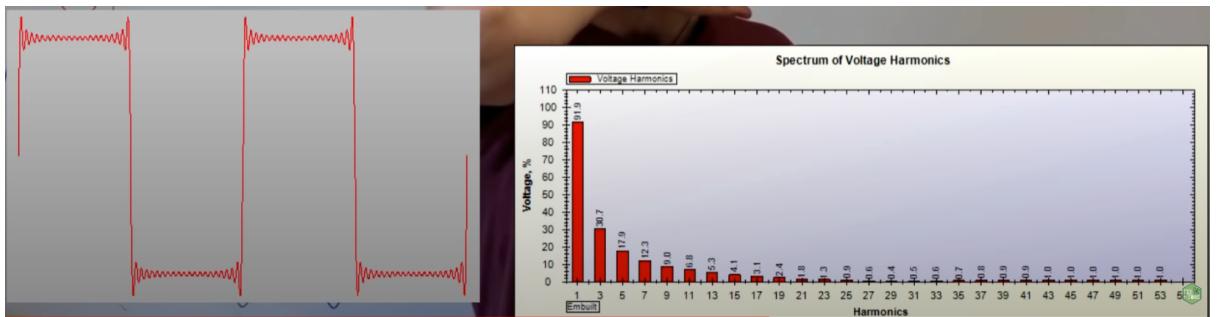
- Solo se puede aplicar convolución cuando el sistema es lineal e invariante en el tiempo (SLTI). Así mismo, un sistema lineal invariante en el tiempo se caracteriza con su respuesta al impulso.
- La respuesta de SLTI a impulsos desplazados en el tiempo son versiones desplazadas en el tiempo del mismo sistema.
- La propiedad distributiva de la convolución nos indica que se puede llegar a la misma salida si el proceso principal se divide en subprocessos simultáneos.

3. **Transformada de Fourier:** indica la representación de señales periódicas mediante una composición de señales senoidales.



Por ejemplo, esta señal está compuesta de 7 señales senoidales, cada una de mayor frecuencia y menor voltaje que la anterior, con fin de volver el resultado "más cuadrado", como la señal original.

Estas señales senoidales se llaman armónicos, y se necesitarían infinitos para una representación exacta.



Ej1:

$$X(t) = e^{-3t} \mu(t)$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-3t} \mu(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$X(\omega) = \int_0^{\infty} e^{-3t} e^{-j\omega t} dt$$

usando propiedades

$$e^{\pm at} \leftrightarrow \frac{1}{j\omega \mp a}$$

$$e^{-3t} \mu(t) \leftrightarrow \frac{1}{j\omega + 3}$$

Observación Fourier:

- Los coeficientes de la Serie de Fourier denotan el aporte de cada exponencial compleja en la señal.

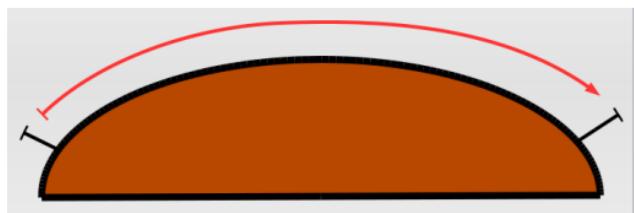
I. Temas a estudiar SCD:

1. Propagación:

Terrestres

Tipos de propagación

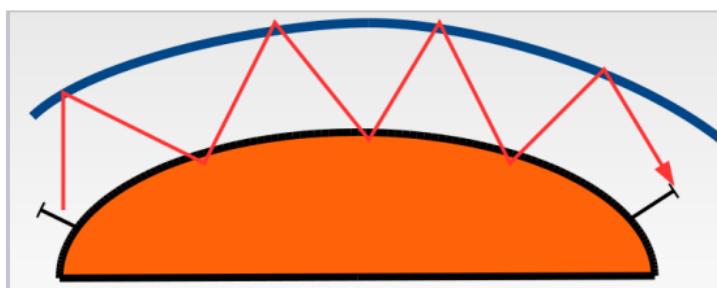
Utilizado para señales con una frecuencia entre los 3 kHz y los 300 kHz. Al ser señales de frecuencia baja estas son capaces de interactuar con la superficie conductora de la tierra permitiéndoles seguir la curvatura de la tierra. Comúnmente son utilizadas por sistemas de navegación de submarinos o aviones.



Ionosféricas

Tipos de propagación

Estas señales tienen una frecuencia entre los 300 kHz y los 30 MHz. A diferencia de las señales terrestres, no pueden seguir la curvatura de la tierra pero son capaces de interactuar con la ionosfera. Esta interacción resulta en un efecto de *rebote* entre la ionosfera y la tierra permitiendo a la señal llegar a su destino. Son utilizadas por radios AM y amateur, además de las comunicaciones de aviones.

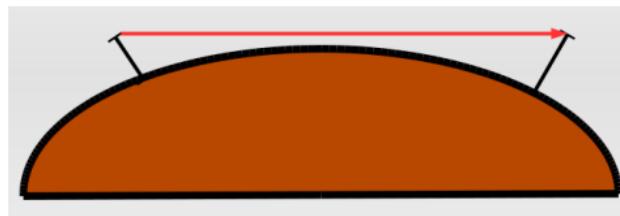


Linea de vista (LOS)

Tipos de propagación

Son señales entre los 30 MHz y los 300 GHz.

Estas señales poseen una longitud de onda tan pequeña (< 1 metro) pueden ser interrumpidas por cualquier objeto y por su alta frecuencia son capaces de traspasar la ionosfera. Esto obliga que ambas antenas deben tener un camino libre que permita verse directamente. Son utilizadas por: WiFi, redes móviles, radares, etc.



2. Información:

- La cantidad de información depende de que tan frecuente es la aparición de un mensaje determinado.
 - Un mensaje **menos frecuente** contiene **más información**
 - Un mensaje **más frecuente**, contiene **menos información**.
 - La cantidad de información sólo **depende** de la **probabilidad del mensaje** y no del contenido en si.

$$I_j = \log_2 \left(\frac{1}{P_j} \right) \text{bits}$$

- P_j : Probabilidad de transmitir el mensaje.

Entropía:

$$H = \sum_{j=1}^m P_j \cdot I_j$$

$$H = \sum_{j=1}^m P_j \cdot \log_2 \left(\frac{1}{P_j} \right) \text{bits}$$

- m : es el número de posibles mensajes.
- P_j : es la probabilidad de mandar el j -ésimo mensaje.

- El sistema óptimo de comunicación es aquel que:
 - Minimiza la BER (Probabilidad de error de Bit) a la salida del sistema,
 - Está sujeto a las restricciones de energía transmitida y ancho de banda del canal.
 - Y lo estudiamos para el caso de ruido blanco gaussiano

Resumen:

- La medida de la información para un mensaje depende de:
 - La probabilidad de aparición del mensaje
- La entropía es la sumatoria del producto de la información por mensaje por su probabilidad.

3. Capacidad:

- La capacidad máxima teórica de un canal depende de:
 - Ancho de banda disponible
 - Relación Señal a Ruido

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

- C: Capacidad de canal en bits/s
- B: Ancho de banda en Hz
- S/N: Relación señal a ruido en veces

Shannon establece un límite, pero no dice como lograrlo.
La eficiencia indica cuánto se ocupa del canal ideal.

$$\eta = \frac{R}{C}$$

- R: Rate de señalización.
- C: Capacidad del canal.

Resumen:

- La capacidad máxima teórica de un canal depende de:
 - Ancho de banda disponible
 - Relación Señal a Ruido
- Y la eficiencia indica cuánto se ocupa del canal ideal con una modulación determinada.

4. Codificación:

¿Qué hacer en caso de errores?

- Fec ->Redundancia
 - Canal simplex
 - Alto retardo
 - Detecta y corrige errores
- ARQ -> Retransmitir
 - Entre computadores
 - Bajo costo
 - Duplex
 - Detecta errores

Cuando transmitimos información a través de cualquier medio, esta se ve expuesta a los efectos del ruido en el canal. El ruido es capaz de dañar la información enviada.

Una de las principales formas para detectar cuando la información enviada fue dañada por el ruido se utiliza la paridad de bits.

| | |
|-------|---------|
| n | |
| Datos | Paridad |
| k | $n - k$ |

Luego se construye una matriz de verificación H (que verifica la validez de un código) y una matriz de generación G (que genera los códigos para los datos que queremos enviar).

Luego un vector de datos X , se le asigna un código C :

$$X \oplus G = C$$

La cantidad de bits erróneos que se pueden detectar es depende de la distancia de Hamming mínima entre todos los códigos posibles.

El problema es la cantidad de códigos validos equivale a 2^k , pero se puede determinar la distancia mínima usando la matriz H : La distancia mínima es igual a la cantidad de columnas linealmente dependientes en H .

Existen casos especiales:

- ▶ Si H tiene una columna con puros 0, la distancia mínima es 1.
- ▶ Si H tiene 2 columnas iguales, la distancia mínima es menor o igual a 2.
- ▶ Si los códigos son binarios y todas las columnas son distintas y no nulas, la distancia mínima es mayor o igual a 3.

Finalmente, el código es capaz de detectar $d - 1$ bits erróneos y corregir $(d - 1)/2$ bits erróneos, donde d es la distancia mínima.

Una de las formas de corregir los bits erróneos es la tabla de síndrome, esta tabla toma el resultado del chequeo de paridad y lo asocia a los bits que provocan ese error. Esto es debido a:

$$mH^t = z$$

Si m es invalido, entonces $z \neq 0$ y hubo una modificación n del mensaje original

$$\begin{aligned} (m_0 + n)H^t &= z \\ m_0H^t + nH^t &= z \\ nH^t &= z \end{aligned}$$

Detección y corrección de errores:

Los códigos Reed-Solomon son buenos corrigiendo ráfagas (bursts) de errores.

Pueden corregir: $t = \frac{n-k}{2}$

Donde **n** y **k** son símbolos, no bits.

CRC (Códigos de Redundancia Cíclica)

- Se utilizan para **detectar (más que corregir) errores** en canales seriales
- Utilizan aritmética donde la suma y la resta son **módulo2 (sin carry)**, osea XOR.
- Un mensaje de k bits: m_{k-1}, \dots, m_1, m_0 se podría representar como **un polinomio de orden $k-1$:**

$$M(x) = m_{k-1}x^{k-1} + \dots + m_1x + m_0$$

Observaciones:

- El Síndrome se usa para detectar la localización de un bit equivocado en una palabra codificada.
- Un código de Hamming puede recuperar t errores, con $d \geq s + t + 1$ (s : errores detectados, d : distancia de Hamming) siempre y cuando la cantidad de errores detectados s sea mayor o igual que t . Ej: un código de Hamming (7,4) con $D_{\min}=3$ corrige 1 y detecta 2 errores.
- Si aumenta la distancia de Hamming aumenta el máximo poder de corrección de error posible.
- Un enlace codificado es más eficiente si la relación de bits de redundancia a bits de datos es 1 a 10.
- Códigos cíclicos:
 - Estos son códigos de grupo que **no contienen la palabra nula** (todos 0).
 - Por ejemplo, el código de **Hamming**.
 - Permite códigos de corrección de **mayor orden**
 - Se pueden armar con **registros de corrimiento** y con compuertas **XOR**
 - Las palabras son sólo **corrimientos de otras palabras**
 - Se pueden representar como **polinomios**
- Reed-Solomon es bueno para corregir bursts de errores. Mientras que CRC se utiliza más para detectar errores (en canales seriales) que para corregir.
- El entrelazado (interleaving) es utilizado en transmisión digital de datos como técnica para proteger la información frente a los errores de ráfaga (burst errors). Es decir, distribuye los errores en ráfaga al alterar el orden de los bits a transmitir, ayudando así a los detectores y correctores.

Empleando técnica **con entrelazado**:

Mensaje sin error:

Entrelazado:

Transmisión con error de ráfaga:

Desentrelazado:

aaaabbbbccccdddeeeeffffgggg
abcdefgabcdefgabcdefgabcdefg
abcdefgabcd_____bcdefgabcdefg
aa_abbbbcccccddde_eef_ffg_gg

En resumen

- Un código agrega redundancia para detectar y/o corregir errores en una secuencia de bits.
- La distancia de Hamming mide el grado de similaridad entre dos secuencias de bit del mismo largo
- La matriz de corrección de error es generada a partir de las ecuaciones que corresponden a la implementación del código.

5. PAM y PCM:

i. PAM

Conversión de una señal analógica a un pulso.

Se genera multiplicando la señal analógica por un tren de pulsos (Filtro Pasabajos).

Donde la AMPLITUD del pulso representa la información analógica.

Existen dos clases de PAM

- Por muestreo natural (por compuerta)
- Por muestreo instantáneo

Características generales de PAM

- El ancho de banda ocupado es mayor que la banda original.
- No sirve para transmisión a larga distancia.
- El rendimiento al ruido nunca es mejor que si hubiéramos transmitido directamente la señal analógica original.
- Se utiliza como paso intermedio hacia otra conversión.
- Se utiliza para muestrear una señal.

ii. PCM:

Al enviar información a través de algún medio, esta información es enviada de forma analógica. La modulación por pulsos codificados (PCM) es una de las formas más básicas de convertir esa información analógica en información digital.

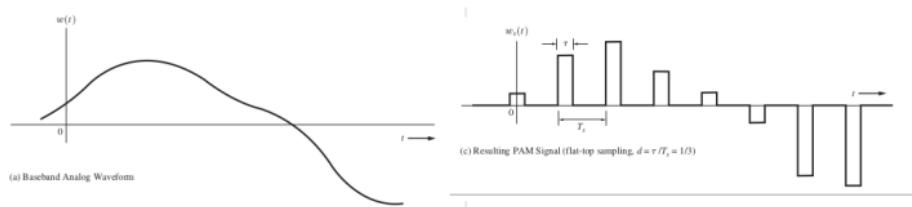
Esta conversión se enfoca en representar cada muestra de la información analógica en un código digital. Esto se hace en 3 pasos principales: Muestreo, Cuantificación y Codificación.

Muestreo

El primer paso es generar muestras de la señal analógica. Esto se logra convirtiendo la señal analógica en una señal de pulsos que utiliza una mayor frecuencia. Para que no se pierda información en el muestreo se necesita que:

$$f_s \geq 2f \text{ Hz}$$

Donde f_s es la frecuencia de muestreo y f la frecuencia de la señal original.



Cuantificación

El siguiente paso es asignar un valor digital a cada posible pulso deseado. De esta forma podremos representar nuestra señal de pulsos en un serie discreta de valores digitales.

El rango de valores que puede tomar una muestra estará definido por los niveles posibles. En general una muestra tendrá un valor entre $[0, M - 1]$ donde M son la cantidad de niveles posibles. En una cuantificación uniforme, definiremos la precisión de la cuantificación como la diferencia porcentual entre 2 niveles consecutivos en nuestra señal de pulsos. Esta diferencia la podemos representar de la siguiente manera:

$$p = \frac{1}{M}$$

Observación:

- El error de cuantificación tiene una amplitud máxima equivalente a un bit del código.

Resumen:

- La cuantificación no uniforme sirve para mejorar la SNR cuando la señal es débil
- Se usan 2 leyes distintas: A y μ .
- Son leyes similares en su objetivo, sólo cambian en la curva de respuesta

Codificación

Como ultimo paso, se tiene que codificar cada valor digital como un código binario o un código multinivel, en general se utilizan códigos binarios para representar los diferentes niveles.

Si se poseen M niveles de cuantificación, estos pueden ser representado como un código binario de largo:

$$n = \log_2(M) \text{ bits}$$

Propiedades de PCM

Una señal que fue modulada con PCM, poseerá el siguiente ancho de banda dependiendo de como se deseé transmitir:

$$\begin{aligned} B &\geq \frac{nf_s}{2} \text{ Hz. Usando } \frac{\sin x}{x} \\ B &\geq nf_s \text{ Hz. Usando señales cuadradas.} \end{aligned}$$

Y la tasa de bits de la señal o bitrate es:

$$R = nf_s \text{ bps}$$

Observación:

- El mejor caso de ancho de banda PCM se da cuando se representa la onda con una señal tipo $\text{sen}(x)/x$.

Relación Señal-Ruido

En cada paso de PCM, se le introduce ruido a la señal original para hacer las conversiones. Por ello en la generación y recepción de una señal PCM se tiene que la relación señal-ruido en los peaks de la señal original se aproxima a:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{peak} = 3M^2 \text{ veces}$$
$$\left(\frac{S}{N}\right)_{peak} = 6.02n + 4.77 \text{ dB}$$

Y la relación señal-ruido promedio se aproxima a:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{promedio} = M^2 \text{ veces}$$
$$\left(\frac{S}{N}\right)_{promedio} = 6.02n \text{ dB}$$

Observaciones PCM:

- La PCM (Modulación por Codificación de Pulsos) es una conversión A/D.
- Las muestras de la señal analógica están representadas por palabras digitales.
- Que conforman un flujo serial de bits.
- Cada una de ellas responde a un único nivel de amplitud.
- El paso de una señal analógica a código se llama cuantificación.
- Mejora el rendimiento de ruido: un sistema digital es más inmune al ruido que uno analógico.
- La gran desventaja es que el ancho de banda del PCM es mayor que el de la banda base.

En resumen:

- El muestreo natural se realiza mediante pulsos de onda cuadrada y se recupera volviendo modulando con una senoidal y con un filtro pasabajo
- El muestreo flat-top se realiza mediante pulsos δ ideales con retención del valor muestreado. Para recuperarlo, se filtra con un pasabajo y se compensa la atenuación en altas frecuencias.
- Se utiliza para muestrear una señal.

- La codificación PCM es resultado de 3 etapas: Muestreo, cuantificación y codificación.
- El muestreo exige al menos el doble de la frecuencia máxima de la señal de entrada
- El ancho de banda a la salida del codificador está dado por la cantidad de bits multiplicada por la frecuencia de muestreo

- Existen varios tipos de ruido en la codificación lineal: sobrecarga, aleatorio y granular.
- El ruido de cuantización se suma al ruido en la señal original

6. **Códigos de Línea:** Un código de línea es el formato de señalización con el que se presentan las señales PCM.

Tipos

- Se pueden clasificar, si éstos retornan 0V a mitad de bit (**RZ**) o no (**NRZ**).
- **Unipolar:** Un nivel para el 1 binario (+A [V]) y para el 0 binario, el valor 0 [V], tambien llamada OOK.
- **Polar:** Los niveles binarios son niveles de tensión positivos y negativos iguales.
- **Bipolar:** El valor de 1 binario se representa por un valor alternado negativo y positivo. El 0 binario es 0 V. Se denomina tambien AMI (Alterned Mark Inversion)
- **Manchester:** Cada 1 binario es representado por $\frac{1}{2}$ período de bit positivo y $\frac{1}{2}$ período de bit negativo. Para el 0 binario es inverso.

Lo ideal

- **Autosincronización:** Se puede extraer de la misma señal la sincronización de bit.
- **Baja BER.**
- **Espectro ajustado al canal:** Si el ancho de banda es menor al del canal, la interferencia entre símbolos consecutivos será menor.
- **Ancho de banda:** El mínimo posible.
- **Capacidad de detección de errores**
- **Transparencia:** Que no se envíen caracteres de control en el mismo canal que el de datos

Observaciones:

- Las palabras de código en un código lineal de grupo se caracterizan porque sumando los pares correspondientes de dígitos de cada una de las palabras de código, produce otra palabra del mismo código.
- Una señal codificada con código de línea Bipolar RZ tiene igual nivel de continua (frecuencia 0) que la misma señal codificada en Manchester.

Resumen:

- Una vez digitalizadas las señales, se codifican y se agrupan los bits para aumentar la eficiencia espectral. Esta técnica se denomina *codificación multinivel*
- Se puede determinar así el mínimo ancho de banda requerido para transmitir una señal codificada con forma de onda rectangular
- La codificación de línea permite:
 - Recuperar los bits en el receptor, mejorando la sincronización con la fuente, manteniendo una mínima alternancia en la señal codificada.
 - Y además, minimizar la energía disipada en la línea, reduciendo el ancho de banda utilizado.

7. Señalización multinivel:

Aclaración

Las señales multinivel tienen menor ancho de banda que las señales binarias.
(Imaginen las onda seno respectivas a igual cota superior e inferior de tensión [V], ¿qué pasa con sus áreas?...)

Eficiencia espectral

Medida de cuántos bits/s de datos se pueden enviar por cada Hertz de ancho de banda que se ocupe:

- Ancho de banda en [Hz]: B
- Velocidad en [Bits/s]: R
- $\eta = (R/B)$

Eficiencia espectral máxima

Suponiendo que el canal no es ideal y tiene ruido asociado, entonces, podemos llegar a (via Shannon):

- $\eta_{max} = (C/B) = \log_2(1 + (S/N))$

8. Interferencia intersímbolo:

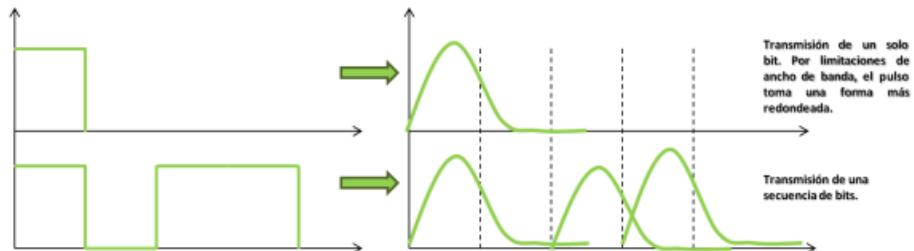


Figura: Ejemplo de cuantificación superpuesta

Aclaración

- Si los pulsos no se filtran correctamente, se dispersan en los tiempos siguientes.
- Por ende, se pueden infiltrar en los pulsos adyacentes (ruido extra por superposición)
 - Los bordes no son verticales cerca del corte.
 - La sincronización en el decodificador debe ser casi perfecta, porque $\sin(x)/x$ es cero en slots adyacentes solamente cuando t tiene el período de muestreo exacto. Si no, habrá ISI (Interferencia intersímbolo).

Para solucionarlo, debemos...

- restringir el ancho de banda para no introducir **ISI**.
- hacer que los pulsos sean lo más precisos posibles.
- generar formas de onda con un ancho de banda levemente más grande (porque se acerca a la forma del cuadrado).
- hacer que haya cruce por cero en puntos de muestreo adyacentes (buen timing).
- Se aplica entonces **Coseno realzado**.

- La velocidad máxima en baudios que puede soportar un sistema con coseno realzado es:

$$D = \frac{2B}{1+r}$$

- B : Ancho de Banda.
- D : Velocidad en baudios.
- r : Roll-off

9. Modulación de espectro expandido:

Algunas facultades

- Capacidad de acceso múltiple.
- Evita, en buena parte, interferencias forzadas y naturales.
- Baja probabilidad de intercepción.
- Capacidad de transmisión encubierta. Por dificultar la identificación de patrones.

Utilidad práctica

- En algunas redes, las bandas de frecuencias suelen ser muy limitadas, en cuanto a cantidad de usuarios.
- Lo anterior, implica **no poder** darle un canal de frecuencia permanente a cada usuario.
- Ésto permite ir asignando dinámicamente según la demanda.
- Algunas tecnologías que implementan espectro expandido:
 - Redes WiFi
 - Redes móviles

Criterios que debe cumplir

- El ancho de banda de la señal transmitida debe ser **mucho mayor** al del mensaje
- La señal de banda ancha debe ser generada por una forma de onda modulante independiente, llamada **señal de spreading**, y debe ser **conocida por el receptor**.

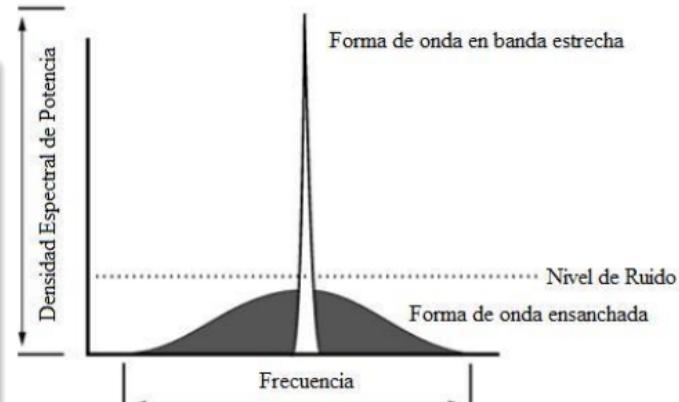


Figura: Cobertura tradicional vs Cobertura en Spread Spectrum

Tipos de Spread spectrum

- **Secuencia Directa (DS):** Una portadora en banda estrecha se modula mediante una secuencia pseudoaleatoria (es decir, una señal periódica que parece ruido pero que no lo es).
- **Salto en Frecuencia (FH, Frequency Hopping):** la frecuencia portadora del transmisor cambia (o salta) abruptamente de acuerdo con una secuencia pseudoaleatoria.
- **Técnicas Híbridas:** Estas fusionan DS y FH.

10. Bit Error Rate:

Definiciones

- Número de bits recibidos de forma incorrecta, respecto al total de bits transmitidos durante un intervalo de tiempo.
- Es usado en telecomunicaciones para modelar un canal de comunicación.
- $BER = E/N$, donde
 - E : N° de bits recibidos con errores
 - N : N° de bits recibidos

Utilidad

- Permite evaluar un sistema de punto a punto. Incluye TRANSMISOR, RECEPTOR Y NODOS INTERMEDIOS.
- Así, el BER permite realizar pruebas para evaluar el rendimiento del sistema en operación real, ya que cada parte puede evaluarse también.
- Una vez hechos los cálculos, existe esperanza de que el sistema se comporte igual cuando esté en el lugar de operación.

Factores que lo afectan

Su valor cambia con todo factor que haga que la RELACIÓN SEÑAL Y RUIDO (**SNR**) pueda empeorar en el camino. Algunos ejemplos son:

- Señales interferentes (rangos de frecuencias y a distintos niveles de ganancia).
- Disminución de potencia irradiada por los transmisores.
- Sensibilidad de los receptores.
- Desenfoque de paráolas (antenas).
- Aparición de ruido físico entre los nodos de enlace (Ej: Edificio nuevo entre antenas).
- El tiempo (lluvia, humedad y tormentas).
- Fallas en los equipos electrónicos (Antenas y guías de onda).
- Entre otros.

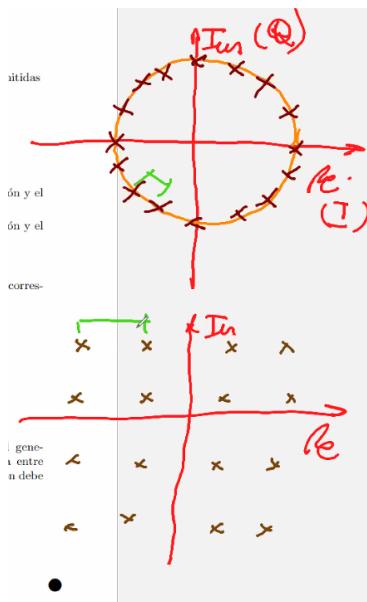
Nos interesa del BER

- Determinar el rendimiento de una modulación específica para un canal determinado.
- Lo anterior, permite elegir alguna con un BER aceptable a las necesidades en el sistema.
- Para ésto, podemos valernos de distintas tablas empíricas e, incluso, gráficos que nos entregan la misma info más visualmente (como el siguiente).

III. Apuntes Varios:

- Un receptor con sensibilidad mejor mejora la comunicación de un enlace.
- Un sistema de cuantificación define la cantidad de niveles necesaria para respetar un error máximo establecido. La relación Señal a Ruido, al igual que la precisión de los valores capturados aumentan con la cantidad de niveles. A su vez, aumentar la relación Señal a Ruido aumenta la capacidad de transmisión.
- Una forma de onda es digital si solo puede adoptar un conjunto discreto de valores de amplitud.
- Una señal $w(t) = A * \cos(\omega_0 t + \theta_0)$ es determinística si para cada valor de t , el valor de $w(t)$ puede evaluarse.
- En una señal muestreada la información entre una muestra y la siguiente se pierde.
- Para reconstruir la señal en un enlace de largo alcance hace falta un repetidor regenerativo.
- Un sistema multiplexado puede tener múltiples fuentes de entrada y salida.

- QAM siempre va a tener mayor distancia entre símbolo que BPSK:



IV. Ejercicios:

1. Práctico Examen 2017-1.

Lo primero a realizar es organizar los datos:

$$f_1 = 2.4 \text{ Ghz} = 2400 \text{ mHz}$$

$$f_2 = 1.2 \text{ Ghz} = 1200 \text{ mHz}$$

$$\text{ancho de banda } B_t = 500 \text{ khz}$$

$$\text{tráfico } R = 200 \text{ Kbps}$$

$$\text{sensibilidad} = -95 \text{ dB para QPSK, } -80 \text{ para 16QPSK/16QAM, } -105 \text{ para BPSK}$$

$$\text{ganancia dipolos } G_a = 12 \text{ dB}$$

$$\text{ganancia parabólicas} = 24 \text{ dB}$$

$$\text{piso de ruido } N_{ref} = -120 \text{ dB}$$

i. Vemos qué enlaces se generan, considerando siempre que no se acumule mucho tráfico en cada nodo (200kbps por enlace).

ii. Distancia d_1 y $d_2 = \sqrt{2rh} \Rightarrow \sqrt{2*8497*10^3m*h}$ // se escoge la altura del peor enlace (el más largo) para calcular la distancia de sus nodos.

⇒ En este caso, el peor enlace es entre Coquimbo y Ovalle, con alturas iguales a 19m + 10m y 219m + 10m.

⇒ Resultado: $d_1 = 22199m$, $d_2 = 62382m \Rightarrow d_{total} = 84581m = 84,5 \text{ km de enlace.}$

Así, se considera que el enlace es viable, ya que la distancia real es menor a la máxima (68,48km < 84.5km). Generalmente este peor caso valida los demás casos también, a excepción de alturas muy menores con distancias de enlace muy similares al seleccionado.

iii. Pasamos al cálculo de potencias: $P_r = P_t * G_1 * G_2 * \lambda^2 / (4\pi d)^2$ // $\lambda = 300 * 10^6 / f$

⇒ pasamos las ganancias de dB a veces: $G_1 = 10^{12/10} = 15.84$, $G_1 = 10^{24/10} = 251.18$ //se pueden ocupar 2 de la misma antena
 $\Rightarrow 1000\text{mW} * (15.84)^2 * (0.125)^2 / (4\pi * 68480\text{m})^2 = 5.29*10^{-9} \text{ mW} = -82.76 \text{ dBm}$

$X_{dB} = 10 \log_{10}(X)$ (X)

$X = 10 \frac{X_{dB}}{10}$ ✓

iv. Pasamos a elegir la modulación: QPSK y BPSK sirven, dado que el umbral de lo que puedo escuchar está debajo de $P_r = -82.76 \text{ dBm}$. Esto también aplica para los demás enlaces por lo mencionado arriba.

OBS: Es necesario obtener el espectro positivo y negativo para que se considere la señal como real, por lo que la banda total (pasante) es el doble de la banda teórica (base). Es decir, si en vez de ancho de banda total (o pasante) dan el ancho de banda base, hay que considerar $2B = R/I$

v. Bits por símbolo y ancho de banda de la modulación seleccionada:

- En BPSK, ocupo 1 bit por símbolo $\Rightarrow 1 \text{ bps} // 2 \text{ símbolos} // \text{densidad } (I) = 1$
- En QPSK ocupo 2 bits por símbolo $\Rightarrow 2 \text{ bps} // 4 \text{ símbolos} // \text{densidad } (I) = 2$
- En 16PSK ocupo 4 bits por símbolo $\Rightarrow 4 \text{ bps} // 16 \text{ símbolos} // \text{densidad } (I) = 4$

| Modulación | Codificación | AB (Hz) | Baudios | Eficiencia AB |
|------------|--------------|------------|---------|---------------|
| FSK | Un Bit | $\geq f_b$ | f_b | ≤ 1 |
| BPSK | Un Bit | f_b | f_b | 1 |
| QPSK | Dibit | $f_b/2$ | $f_b/2$ | 2 |
| 8-PSK | Tribit | $f_b/3$ | $f_b/3$ | 3 |
| 8-QAM | Tribit | $f_b/3$ | $f_b/3$ | 3 |
| 16-PSK | Cuadribit | $f_b/4$ | $f_b/4$ | 4 |
| 16-QAM | Cuadribit | $f_b/4$ | $f_b/4$ | 4 |

Luego $D = 2B = R/I$

$\Rightarrow 2B = 200\text{bp seg}/1\text{bp símbolo } (I = 1 \text{ bit por símbolo para BPSK}) \Rightarrow B = 100 \text{ khz}$
//banda que requiero para transmitir con la modulación BPSK. Es viable dado que cuento con 500 khz. En caso de habernos quedado cortos, habría que haber considerado otras modulaciones.

vi. Si hubieran restricciones de ruido, habría que determinar el Eb/N0 para la modulación seleccionada desde la gráfica.

$S/N = Eb/No * Rb/2B \Rightarrow 10 * 400\text{ kbps} / 200 \text{ kHz} = 20 \text{ veces} \Rightarrow 13 \text{ dB}$ //esto es lo que se necesitaba como mínimo para tener cierta probabilidad de error de bit (eje y en el gráfico). Si quisiera menos, tendría que entregar más potencia.

$S/N \text{ propuesto} = -82.76 - (-120) = 37.24 \text{ db} \sim 38 \text{ db}$ //esto es lo que tengo, sobrepasando las especificaciones, por lo que no hay problemas con esta solución.

2. Práctico Exámen 2017-2.

ancho de banda disponible $B_t = 500 \text{ kHz}$

sensibilidad equipo = -70 dBm para las modulaciones de 6 bits por símbolo

-75 dBm para las modulaciones de 5 bits por símbolo

-85 dBm para las modulaciones de 4 bits por símbolo

-100 dBm para las modulaciones de 3 bits por símbolo

-105 dBm para las modulaciones de 2 bits por símbolo

piso de ruido = -115 dBm

$P_t = 1 \text{ mW}$

$f = 2.4 \text{ GHz}$

i. Como las distancias de altura no importan, me fijo en la mayor distancia, que es desde el metro Príncipe de Gales al Unimarc = 1896 m
⇒ comprobando en la fórmula: $\sqrt{2*8497*10^3\text{m}^3\text{h}} = 13036 \text{ m} \Rightarrow$ la distancia máxima que puede tener el enlace es de 26072 m = 26 km >> 1,8 km por lo que los enlaces son factibles en cuanto a distancia

ii. $P_r = P_t * G_1 * G_2 * \lambda^2 / (4\pi d)^2$

⇒ $P_r = P_t * G_1 * G_2 * \lambda^2$

⇒ $\lambda = 300 * 10^6 / f = 300 * 10^6 / 2400 * 10^6 \text{ Hz} = 0.125$

⇒ Ahora hay que elegir la antena adecuada para obtener la ganancia.

OBS: Para cada caso hay que fijarse en:

-ganancia de las antenas [dbi] (= db para estos ejercicios)

-su rango de frecuencias

Si elegimos la primera antena, tendríamos $G_1 = G_2 = 16 \text{ dB}$.

⇒ Si elegimos el cable Series 240 tendríamos 4.54 dB de atenuación por 10 metros de cable. Luego la potencia atenuada de transmisión sería $P_t = 30 - 4.54 - 1 - 2 = 22.46 \text{ dB} = 176.19 \text{ mW}$

⇒ $P_r = 176.19 * 16 * 16 * (0.125)^2 / (4\pi * 1896)^2 = 1.2414 * 10^{-6} = -59 \text{ dB}$

⇒ $P_r (\text{atenuada}) = -59 - 4.54 - 1 - 2 = -66.54 \text{ dB}$

iii. Dada la potencia recibida, podemos utilizar cualquier modulación. En este caso se elige QPSK, que ocupa 2 bits por símbolo y tiene una sensibilidad de -105 dBm.

iv. Como tenemos el ancho de banda total $\Rightarrow B = R/I = 2*10^6/2 = 1 \text{ mHz} > 500 \text{ kHz}$
 \Rightarrow Como no es suficiente escogemos otra modulación disponible. En este caso, se elige 16PSK, que ocupa 4 bits por símbolo y tiene una sensibilidad de -85 dBm.
 \Rightarrow Luego $R/I = 2*10^6/4 = 500 \text{ kHz}$, que esta vez sí cumple.

3. Práctico Exámen 2019-1

i. Se escoge la mayor distancia, que es desde la cabecera 8 al UOCT = 5775 m
 \Rightarrow comprobando en la fórmula: $\sqrt{2*8497*10^3m*8} = 11659 \text{ m} \Rightarrow$ la distancia máxima que puede tener el enlace es de 23319 m = 23 km >> 5.7 km por lo que los enlaces son factibles en cuanto a distancia.

ii. $Pr = Pt * G1 * G2 * \lambda^2 / (4\pi d)^2$
 tenemos:
 $\Rightarrow \lambda = 300*10^6 / f = 300*10^6 / 2400*10^6 \text{ Hz} = 0.125$

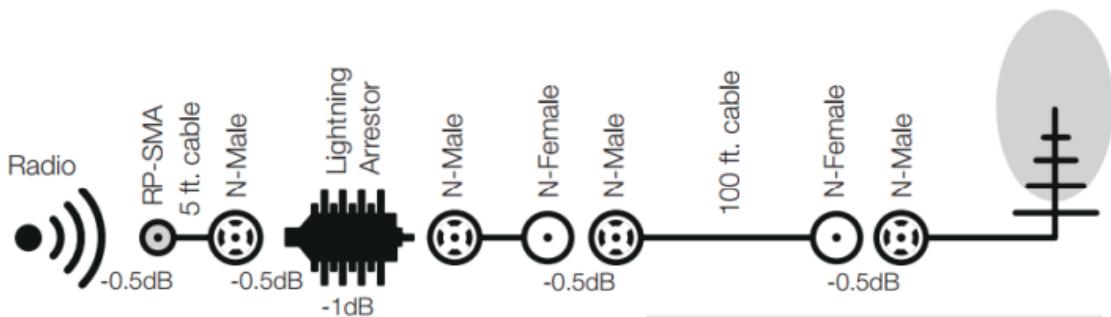


Fig 8. Calculating total signal loss for an antenna cable

Total Signal Loss Calculation

$$\begin{aligned} \text{Connectors (4)} &= -2.0 \text{ dB} \\ \text{Lightning Arrestor} &= -1.0 \text{ dB} \\ \text{Cable (105 ft)} &= -4.095 \text{ dB} \\ \text{Total} &= \boxed{-7.095 \text{ dB}} \end{aligned}$$

\Rightarrow Notamos que el cable de 240 series tiene un grosor y una pérdida aceptables, dado que son 3.632 dB en 8 metros de cable, por lo que tenemos una atenuación A = 3.632 + 2 (conectores) + 1 (lightning arrestor) dB = 6.632 dB, luego la potencia transmitida queda en 20 dB - 6.632 dB = 13.368 dB = 21.71 mW
 \Rightarrow Antena seleccionada: $G1 = G2 = 16 \text{ dB} \Rightarrow 39.8107 \sim 40 \text{ mW}$
 Quedaría $Pr = (21.171 \text{ mW}) * 40 * 40 * (0.125)^2 / (4\pi * 5775 \text{ m})^2 = 1.038 * 10^{-7} \text{ mW} = \boxed{-69.83 \text{ dBm}}$

$$\text{Luego } Pr = -69.83 \text{ dBm} - 6.632 \text{ dB} = \boxed{-76.44 \text{ dBm}}$$

iii. Cualquier modulación puede emplearse bajo el criterio de la potencia recibida ($Pr = -77 \text{ dBm}$).

iv. $400 \text{ kbytes} = 3200000 \text{ bits} \Rightarrow 1000 \text{ imágenes} = 32 * 10^8 \text{ bits al dia} \Rightarrow 37037 \text{ bits por segundo}$

$\Rightarrow R = 37037 \text{ bits por seg} = 37 \text{ kbps}$

\Rightarrow Luego, se tiene $B = R/I$, que debe ser menor a 1 MHz, lo que se cumple de sobra ya que en el peor caso (QPSK $\Rightarrow I = 2$) se tiene un $B = 18.5 \text{ kHz} \ll 1000 \text{ kHz}$.

v. No lo piden, pero si buscarse una probabilidad de error de 10^{-6} con QPSK:

$E_b/N_0 = 15$

\Rightarrow Luego $15 * R_b/B = 15 * 37/18.5 = 30 \text{ khz} = 14.77 \text{ db}$

\Rightarrow Piso de ruido = -120 dBm $\Rightarrow -76.44 - (-120 \text{ dBm}) = 43.56 \text{ dB} > 15 \text{ db}$, lo que indica que esta topología es factible respecto del SNR.

alternativas 2019-1 arriba a - b / abajo c - d

1. a
2. d
3. b
4. c
5. a
6. b
7. b
8. c
9. a
10. c
11. a
12. a

alternativas 2020-2

1. b
2. d
3. ya se vio
4. -
5. c
6. b
7. b
8. c
9. a
10. c
11. a
12. a