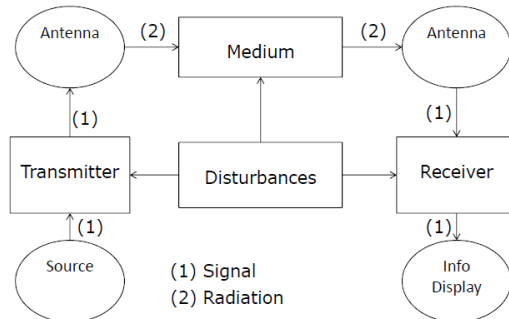


Capítulo 2: Tecnologías Básicas de Radio

Bloques de un sistema genérico de Radiocomunicación:

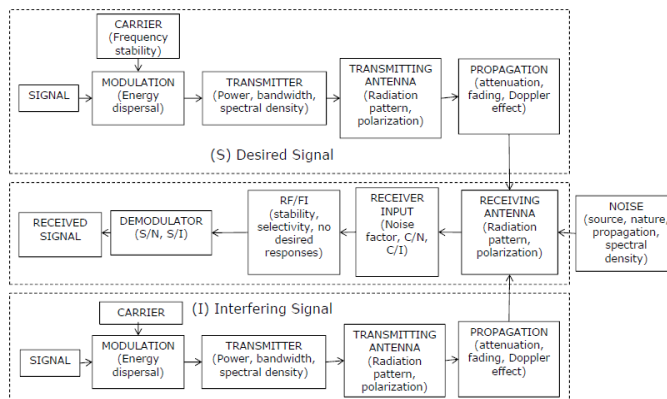
- Esquema General:



Disturbances: perturbaciones

Se va a tratar de proteger a la Transmisión de las perturbaciones.

- Modelo básico: Señal deseada, Interferencias y Ruido.



-El Transmisor aumentará su potencia, de manera que, a la salida se pueda llevar a la antena transmisora para enviar los datos.

-Sin embargo, en los casos reales, además de recibir la señal, se introducen interferencias en el receptor.

-En el demodulador, la relación Señal/ Ruido (Portadora/Ruido) informa de qué parte de la señal es “buena” (información) y qué parte es interferencia. Ante esto, mostrará si el receptor funciona o no.

Codificación, Entrelazado y Modulación:

- Codificación:
 - En cualquier comunicación digital los errores ocurren cuando alguno de los bits transmitidos se recibe con un valor incorrecto. En los sistemas de Radiocomunicación los errores ocurren a menudo, debido a la baja potencia de la señal recibida (portadora).
 - FEC (Corrección de Errores hacia Adelante) es una técnica que permite la detección y corrección de bits erróneos añadiendo bits redundantes a los bits de dato (por ejemplo, la paridad, código Hamming...).
 - La Tasa de Codificación se trata de la relación entre los bits de datos (información) y los totales (bits de datos + bits de redundancia) es conocida como “Code Rate”, y ha de ser menor que 1. Cuanto menor sea el valor de la

tasa, mayor será la protección de los datos, pero se perderá en efectividad. Los "code rates" más usuales son: 1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, o 7/8, siendo 1/4 la más protectora de datos y 7/8 la menor.

- El uso eficiente del bitrate del espectro se obtiene multiplicando el bruto del bit rate (total) por el "code rate".
- Hay varios tipos de Codificación. Los mejores son los que maximizan el número de errores corregidos con un "code rate" dado, normalmente más costosos según aumenta la complejidad del proceso, lo que conlleva un mayor tiempo de procesamiento, mayores necesidades hardware y mayor consumo de potencia.
- En España se envía a una tasa neta de 19,9 Mbps, neta, ya que indica en canal disponible. Se emplea un "code rate" para los envíos de 2/3. Por lo que, el total enviado es de casi 30 Mbps. Por lo que, sin contar los bits redundantes, en TDT, por ejemplo, cabrían 2 canales más.

- Entrelazado:

En este caso, se consigue que los bits que llegan erróneos, tarden un tiempo mayor en llegar. De esta forma, se consigue que siempre estén más cerca los bits correctos.

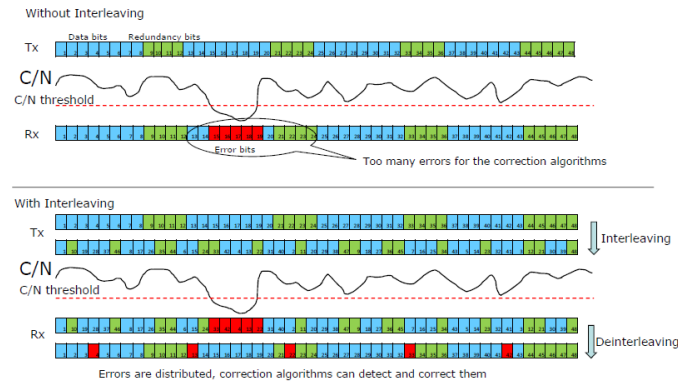
- En algunos sistemas, para mejorar el comportamiento de la codificación del canal, se añade una etapa de entrelazado tras la misma.
- El entrelazado mezcla los bits codificados en el transmisor y los reorganiza en el receptor.
- El efecto es que los errores ocurridos durante un corto período de tiempo son distribuidos a través de un largo tiempo, y los bits erróneos, consecuentemente, son distribuidos de una forma más uniforme, lo cual ayuda a los algoritmos de detección y corrección de errores en el receptor.
- El inconveniente es el tiempo de latencia, que aumenta. Esto se debe a que los bits llegan desordenados y, hasta que no se reciben todos, el receptor no puede recuperar partes completas. Es decir, el receptor tiene que esperar a todos los bits necesarios para decodificarlos cuando son recibidos.

Desventajas:

- Exige memoria RAM: para almacenar en un "Buffer" los bits que van llegando.
- Tiempo: el entrelazado es una de las principales razones para el retardo de la voz en GSM y para el tiempo de retardo cuando se realiza "zapping" en TDT (debido a la codificación de vídeo y al entrelazado).

Por ello, en sistemas bidireccionales no se puede permitir el entrelazado, ya que provoca un retardo muy largo.

Ejemplo:



Se produce el entrelazado después de la codificación, los bits se mezclan en la transmisión.

Vemos que en el receptor deshace el entrelazado, al aparecer los errores, el decodificador los puede corregir, gracias a haberlo extendido más tiempo.

- **Modulación:**

Siempre es posterior a la codificación y entrelazado.

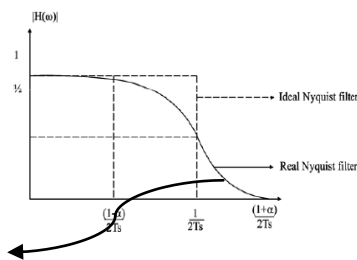
- Se trata del proceso de transferencia de información de la señal moduladora en banda base a cualquiera de las características (amplitud, frecuencia, fase) de la señal portadora generada por el oscilador local.
- El proceso de modulación digital asocia la información de la secuencia a un grupo de amplitudes discretas, o frecuencias portadoras o fases.
- La modulación también puede estar basada en una combinación de esos parámetros (esto es, adaptando tanto amplitud como fase de la portadora a la secuencia de información).
- **Canal de filtrado:**
 - La ayuda de este canal es el control del solape con el espectro adyacente, así como la reducción de la ISI, producidas por las limitaciones del ancho de banda del canal de transmisión.
 - Esto se consigue asegurando que la función de transferencia del canal de filtrado se encuentra tan cercana como sea posible de la respuesta en frecuencia de Nyquist. Y es que, si nos olvidamos del filtrado inicial, puede aparecer un ancho de banda más grande que el del canal de transmisión, por lo que no valdría. O, incluso, si se llevara a cabo el filtrado posteriormente, se produciría ISI. Por tanto, como se ha comentado, la solución es el filtrado antes de la modulación. Concretamente, el filtrado de Nyquist (es decir, lo más cerca de dicha frecuencia, ya que es irrealizable). Hay que acercarse lo máximo posible a ésta. Para ello se emplean pulsos rectangulares, cuyo período es el período de símbolo, en frecuencia, que son sincs en tiempo (infinitas).
 - Nyquist provee el ancho de banda teórico mínimo para que el sistema sea capaz de detectar tantos símbolos recibidos por segundo sin ISI (R_s). Siendo este ancho de banda, $R_s/2$.
 - Esto ocurre cuando la función de transferencia del sistema es rectangular y constante entre cero y $1/2T_s$.

$$H(f) = T_s \quad f \leq 1/2T_s$$

$$H(f) = 0 \quad f > 1/2T_s$$

$$h(t) = \text{sinc}(t/T_s) = \frac{\text{Sen}(\pi t/T_s)}{\pi t/T_s}$$

- La respuesta impulsional obtenida de esta forma, no es factible en la práctica.
- Para superar estos problemas, Nyquist propone en un corolario como estándar, el uso de un nivel controlado del exceso de ancho de banda.
- Una respuesta en frecuencia suave (baja) es obtenida si añadimos una función con simetría impar en relación a $1/2T_s$, frecuencia de Nyquist, al espectro ideal de la ecuación.



Sin embargo, aparece un problema: parte del filtrado se introduce en la zona de frecuencia que estaba libre.

■ Filtro en coseno alzado:

- El factor de roll-off representa el exceso de banda requerido sobre el ancho de banda ideal de Nyquist. Con $\alpha=0$, el ancho de banda ocupada es el mínimo y se corresponde al ideal de Nyquist.
- Con $\alpha=1$, se requiere el doble de banda, e igual a $2/T_s$. El factor α puede ser elegido, teniendo en cuenta esto, en el caso de condiciones teóricas sin interferencia alguna, con la siguiente relación:

$$1 + \alpha \leq BW$$

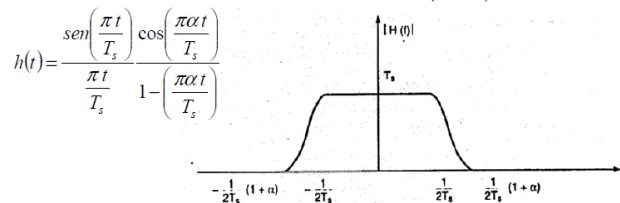
- Donde, BW es el ancho de banda del canal de radio-frecuencia normalizado a la frecuencia de símbolo. En la práctica, los valores de α se encuentran en un rango entre el 15% y el 40%.
- Expresiones:

$$H(f) = T_s \quad |f| \leq \frac{(1-\alpha)}{2T_s}$$

$$H(f) = T_s \cos\left(\frac{\pi T_s}{2\alpha} \left[|f| - \frac{(1-\alpha)}{2T_s}\right]\right) \quad \frac{(1-\alpha)}{2T_s} < |f| < \frac{(1+\alpha)}{2T_s}$$

$$H(f) = 0 \quad |f| \geq \frac{(1+\alpha)}{2T_s}$$

T_s Symbol period
 α ($0 < \alpha < 1$) Filter roll-off factor



- En una modulación binaria, cada bit se corresponde con un nivel de modulación o símbolo. La tasa de modulación, Vs (símbolos/segundo) es expresada en baudios y coincide con el "bit rate". La eficiencia teórica del espectro en las modulaciones binarias es de 1bit/s/Hz.

V_s (baudios)= V_b (Bits/s) -> Se debería aplicar el factor de "roll-off" para conocer el ancho de banda a aplicar. Por ejemplo:
 $V_b=1$ Mb/s; $V_s=1$ Mb/s; $T_s=1/V_s$; BW con $\alpha=0.3$: $BW = (1+ \alpha)1/T_s = 1.3$ MHz (aprox).

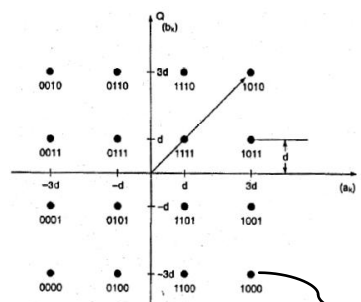
- En modulaciones multinivel, cada símbolo de "m" bits se corresponde con un nivel de modulación. El número de estados de los niveles de modulación es $M=2^m$. Por lo tanto, las relaciones entre tasas y períodos de símbolo (V_s y T_s) y de bit (V_b y T_b) son, respectivamente:

$$V_s(\text{baud}) = \frac{V_b}{\log_2 M} = \frac{V_b}{m} \quad T_s = \log_2 M \cdot T_b = m \cdot T_b$$

- La eficiencia teórica del espectro es: $m = \log_2 M$ bits/s/Hz.

- Puntos de constelación:

- Representan los estados de la modulación: valores de pares, a_k y b_k , en coordenadas cartesianas (eje x= I, eje y= Q).
- El módulo y la fase del vector que une el origen con cada punto de constelación, es, respectivamente, la amplitud y fase de la portadora al nivel de modulación correspondiente al símbolo representado por ese punto.
- Distancia de decisión, d: mitad de la longitud del segmento que une dos puntos consecutivos de la constelación. Cuanto mayor sea esta distancia, mejor, sino los puntos llegarían con ruido y producirían errores.
- La asignación se hace, normalmente, de acuerdo con el código Gray:
 - Los estados de la constelación adyacentes sólo difieren en un único bit.
 - La tasa de error de bit es minimizada cuando ocurren errores de demodulación. Por ejemplo, para evitar que un único error de detección de símbolo produzca 4 a su vez. De esta manera, minimiza el número de errores cuando la detección no es la adecuada.
- Ejemplo:



La señal transmitida se corresponde a esos puntos.

En este caso, se emplea una modulación 16 QAM. Es decir, por cada símbolo, 4 bits se pueden enviar ($4 \times 4 = 16$).

- Algunas Modulaciones usadas en sistemas de radio:

Type	
PSK, Phase-shift keying	Quadrature PSK (QPSK - 4PSK)
	Differential QPSK (DQPSK),
	Offset QPSK (O-QPSK)
QAM, Quadrature amplitude modulation	16, 64, 256, and 1024

Se aprecia que, en QAM, han de ser potencias de 2, pero que, además, sólo puedan formar cuadrados en cuanto a la repartición de bits de símbolo.

Actualmente, pueden emplearse constelaciones mayores. Y es que, debido a la detección de errores, los sistemas actuales son más complejos, pero más eficientes.

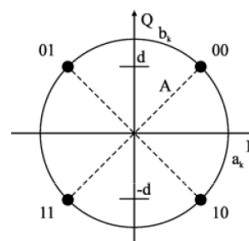
▪ Ejemplos de Esquemas de Modulación:

- Modulación por desplazamiento de fase 4 PSK o QPSK:

$$\phi_k = (2k+1) \cdot \frac{\pi}{4} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

$$a_k = A \cos \phi_k$$

$$b_k = A \sin \phi_k$$



- A es la amplitud de la portadora, calculada como $A^2 = a_k^2 + b_k^2$.
 - La potencia media de la señal modulada es tanta como la potencia de la portadora. Este valor está estandarizado a $A^2/2$:

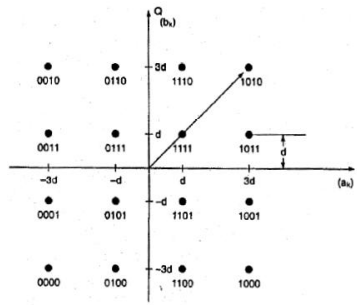
$$e_b = \frac{A^2}{2} \cdot T_b = \frac{A^2}{2 \cdot V_b}$$

- La energía media por bit, es por tanto:
- Modulación de Amplitud en Cuadratura a 16 niveles (16 QAM):
 - Los valores máximos y mínimos de amplitud de la portadora modulada: $A_{max} = \sqrt{18d}$; $A_{min} = \sqrt{18d}$
 - La potencia media de la señal modulada: $P_m = 4/16 P_c$, donde, P_c es la potencia en un cuadrante. Se trata de la potencia en cada punto por la probabilidad que tiene de que éste aparezca.

$$P_c = \frac{1}{2} A^2 + 2 \frac{1}{2} \left(\frac{A\sqrt{10}}{3\sqrt{2}} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{A}{3} \right)^2 = \frac{10A^2}{9}$$

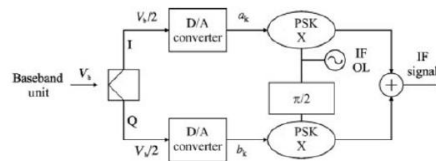
Por tanto: $P_m = \frac{P_c}{4} = \frac{5A^2}{18}$

- Dispersión energética: hace que cada uno de los puntos sea igual de probable.



Damos valor a la rama de arriba, damos valor a la rama de abajo, y, finalmente, sumamos.

▪ Diagrama de bloques del típico Modulador en cuadratura:

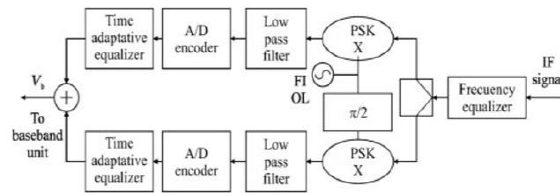


- El flujo de bits entrante que corresponde con la señal de radio, a V_b (bits/s), es dividido en dos flujos a la mitad de “bit rate”, es decir, $V_b/2$, que alimenta cada rama, I y Q. Ante esto, la mitad decide el valor de una rama y, la otra mitad, la de la otra rama, es decir, elige I o Q. La amplitud la rigen dichos valores, y, según I y Q se obtiene la señal compuesta.
- La señal binaria es convertida en una secuencia multinivel en cada rama, generando los símbolos de modulación a_k y b_k .
- Tras la etapa de filtrado pre-modulación, la portadora, desde el oscilador local, es modulada usando la secuencia de símbolos de entrada.
- El proceso implicará la componente en fase de la portadora $\cos(\omega_c t)$ en la rama superior, eje I, y la componente en cuadratura, $\sin(\omega_c t)$ en la rama inferior, eje Q.
- La frecuencia de la portadora es la Frecuencia Intermedia: FI. La característica principal de esta frecuencia es que ha de ser, como mínimo, la mitad del ancho de banda de la señal modulada: $FI \geq BW/2$.
- La señal de salida será de la forma:

$$y(t) = \sum_k [a_k h_i(t - kT_s) \cos \omega_c t - b_k h_i(t - kT_s) \sin \omega_c t]$$

➤ Donde, $h(t)$ es la respuesta al impulso del filtro pre-modulación y T_s es el período de símbolo. Cada símbolo o nivel de modulación es definido por el par de símbolos de modulación a_k y b_k , en grupos de $\log_2 M/2$ bits.

▪ Diagrama de bloques del típico Demodulador en cuadratura:



- La señal que viene del Amplificador de Frecuencia Intermedia, tras atravesar el **Ecuador de Frecuencia**, es puesta en las ramas I y Q, y la demodulación coherente en fase y cuadratura tiene lugar. El Ecuador en Frecuencia gira la fase de la señal entrante lo necesario para adaptarla.
- Los valores x_k, y_k son obtenidos durante el proceso de **muestreo**, y , basadas en él, un **decisor** provee las estimaciones $a_k y b_k$ de los símbolos transmitidos.
- Para obtener de cada rama los valores I y Q, se lleva la Frecuencia Intermedia a la frecuencia cero. Concretamente lo hace el demodulador en cuadratura.
- Y, multiplicando por los valores del coseno y seno, respectivamente, se obtiene la **señal en banda base I y la señal en banda base Q**.
- En una situación sin interferencia, pero con ruido:

$$\begin{aligned} \text{I Channel } x_k &= a_k h(0) + n_{Ik} \\ \text{Q Channel } y_k &= b_k h(0) + n_{Qk} \end{aligned}$$

for the general k_{th} symbol

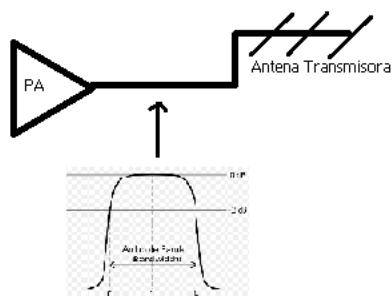
- Donde, $h(0)$ es la respuesta al impulso del filtro con $t=0$.
- n_{Ik}, n_{Qk} son las muestras de ruido en los instantes kT_s , asociados a los canales I y Q. Dicho ruido, movería un poco el punto donde se recibiría el símbolo y se podrían producir errores. Por este motivo resulta importante una buena **SINCRONIZACIÓN** en tiempo con el receptor.
- Estas señales se obtienen mediante **filtros paso-bajos**.
- El **convertidor A/D** transforma los símbolos estimados en grupos de bits que se disponen en serie por el convertidor paralelo/serie (para realizar una transmisión serie, que es la empleada actualmente). Esto se debe a que la señal va tomando valores que cambian con el tiempo según los bits, pero se desea obtener los valores concretos que se transmitían. Por lo tanto, se convierte a digital.
- La señal de salida de este bloque es la señal binaria al “bit rate” V_b bits/s.
- Cuando se usa la ecualización digital en banda base, los ecualizadores se incorporan aquí.
- El proceso de demodulación requiere que el momento oportuno (coordinado en tiempo) donde los símbolos recibidos son recuperados, se conserve sincronizado a la frecuencia de símbolo f_s .

Por lo que, la ecualización se basa en el período de símbolo y, de esta manera, también se van a ir obteniendo los valores de las amplitudes.

- En esos instantes, el receptor debe decidir sobre el valor de símbolo y recuperar la secuencia correcta de símbolos y bits. Y es que, en recepción no llega un punto exacto, sino que hay que decidir los valores, y pueden venir errores. Para esta coordinación en tiempo, se usa el **Ecuador de Tiempo Adaptativo**, que se relaciona, más concretamente, con los pulsos de la señal con el fin de evitar la ISI.
- Son necesarios **circuitos adicionales** para el transporte y la recuperación coordinada en tiempo de los símbolos transmitidos para que el demodulador coherente opere correctamente.

El Transmisor:

- El transmisor toma la señal modulada a la FI y la lleva al canal de radio-frecuencia por medio de un mezclador y amplifica dicha señal con Amplificadores de Potencia (PA), que son la última etapa de un transmisor, para lograr el nivel de potencia requerida (desde algunos vatios hasta kW). Requiere, para ello, mucha potencia, para que el receptor sea capaz de recuperarla.
- Normalmente, el filtro del canal de Radio-Frecuencia es añadido al final de la etapa para eliminar o evitar la parte de señal que no se desea que sea radiada. Se emplea un filtro paso-banda ajustado a la frecuencia de canal para evitar que las no linealidades molesten al resto de transmisiones.



- Los Amplificadores de Potencia son muy sensibles a la potencia reflejada, así que una buena adaptación con la antena transmisora es muy importante. En algunos casos hay sensores especiales que miden la potencia reflejada, y, en caso de discordancia o incompatibilidad, el transmisor es apagado para evitar daños permanentes.
- Los PA también son responsables de parte de la degradación de la señal transmitida debido a su no linealidad.
- En el diseño de transmisores se necesita una compensación entre la eficiencia (qué % de potencia consumida se convierte en potencia de Radio-Frecuencia) y la degradación de la señal. Es decir, conseguir un equilibrio entre la linealidad y el consumo de potencia. Se puede perder potencia en el consumo interno del amplificador, pero interesa que el rendimiento sea alto.

Antenas:

- Introducción:
 - Las antenas son los aparatos que adaptan las ondas guiadas, las cuales son transmitidas por cable o guías a las ondas radiadas propagadas en el espacio libre, a la vez que añaden características seguras de direccionalidad. Es decir,

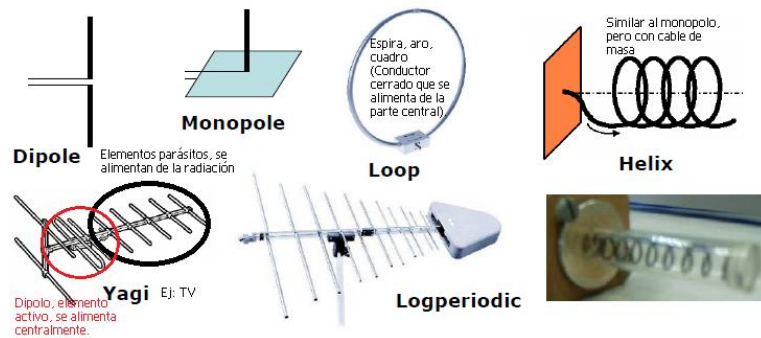
se trata de dispositivos que adaptan la onda producida a una onda radiada, en Transmisión y, justamente lo contrario, en recepción.

- Por tanto, son las partes de los sistemas de telecomunicación encargadas de radiar o recibir OEM.
- Dependiendo del sistema de comunicación, las antenas son usadas para enlaces punto-a-punto, para radiodifusión de señales de radio o TV, transmitir o recibir señales en equipos portátiles... En cualquier caso, las antenas deberían tener características específicas: radiación, tamaño... Por ejemplo, en ocasiones, interesan antenas que radien hacia un punto fijo: radioenlace a un punto fijo.

• Tipos:

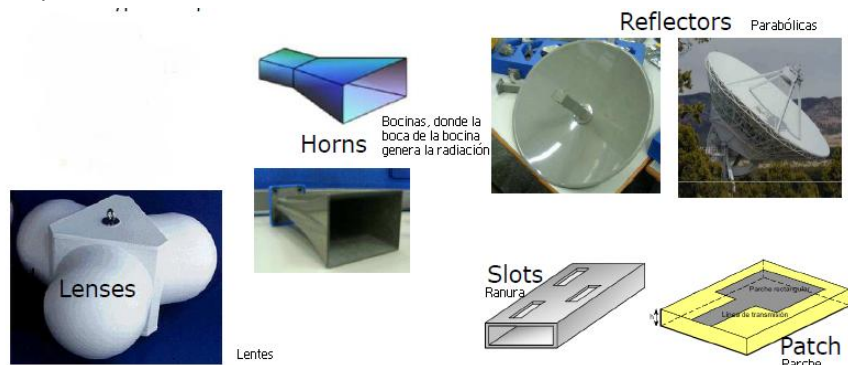
Normalmente, las antenas se clasifican de acuerdo a su geometría en los siguientes tipos:

- Antenas **lineales o cableadas**: formadas por una vara, o elementos cableados. El conocimiento de los actuales flujos que atraviesan los cables son usados para obtener campos de radiación. Estas antenas tienen en común que todas están formadas por conductores estrechos en los que hay que calcular la corriente. En ellas, la dimensión de la antena se equipara a la longitud de onda. Tipos, gráficamente:

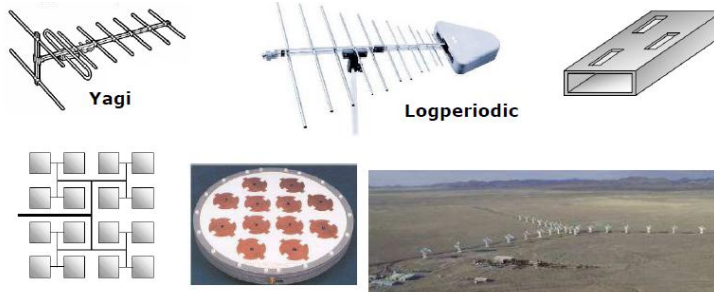


- Antenas **de apertura**: formadas por una superficie abierta en la cual se produce la distribución de campos. Esta distribución genera radiación a través del espacio. Para estudiar los campos radiados es necesario conocer los campos en la apertura.

- Dependiendo de cómo los campos son generados en la apertura, se dan 5 tipos de antenas:



- Antenas de **array**: formadas por un grupo de antenas operando como si fueran una única antena. El patrón de radiación depende principalmente del factor del array y, en menor medida, del diagrama de cada antena individual.
 - Normalmente todas las antenas son iguales, pero, en algunos casos, pueden ser diferentes. Por ejemplo, las Yagi o las Logoperiódicas.



Además, cabe destacar que se puede conseguir adaptar el movimiento de un array completo sin mover la antena. Es decir, únicamente gira el eje, pero estando la misma quieta. Así se consigue que apunte a otra dirección deseada, sólo empleando el desfase de corrientes, lo que permite un gran ahorro económico en sistemas de giro.

- Parámetros:

- Los parámetros que definen las características de una antena pueden estudiarse, sin importar el tipo o cómo se produce la radiación.
- El **Teorema de Reciprocidad** declara que las antenas tienen las mismas características cuando son usadas tanto en transmisión, como en recepción. Y es que, si una antena sirve para una frecuencia de transmisión, también sirve esa frecuencia para la recepción. De la misma manera, si la Z_{in} es una para la recepción, es la misma para la transmisión.

- **Impedancia:**

Característica principal de las antenas, define si una antena es antena o no (ej: paquete de Pringles para el WiFi).

- La antena será la última parte del sistema de transmisión y el amplificador de transmisión verá a ésta como una carga. Por tanto, la antena es equivalente a una impedancia que disipa la potencia generada en el generador. Sin embargo, la potencia no es disipada, sino radiada.
- Empleada para lograr la máxima transferencia de potencia y la antena debe estar adaptada para ello: Adaptación de Impedancias. Si está adaptada, es capaz de recoger la energía del aire y recibir/transmitir y radiar, consecuentemente. No obstante, puede irse desadaptando si no se encuentra en el ancho de banda determinado.
- La **impedancia de entrada de la antena (Z_{in} , Z_a o Z_{en})** es definida tanto en los terminales de voltaje/corriente como en el punto de voltaje/corriente.
- En general, consiste en una parte real $R_{in}(f)$ y una imaginaria $X_{in}(f)$ que dependen de la frecuencia: $Z_{in}(f) = R_{in}(f) + jX_{in}(f)$.

- Si la Z_{in} no tiene parte reactiva a una cierta frecuencia ($X_{in} = 0$) quiere decir que se convierte en una antena de resonancia en esa frecuencia. Es decir, cuando se anula la parte imaginaria, se da una antena resonante.
- Como la antena radia la energía, hay una pérdida neta de potencia, o sea, no hay trasvase neto de potencia. Esta pérdida puede ser asignada a la Resistencia de Radiación: R_r , que se define como el valor óhmico de la resistencia que disipa la misma potencia que la que radia la antena. Es decir, la potencia radiada sería la misma que la que disiparía una resistencia de radiación.
- Pero, no toda la energía entregada de la antena es radiada, parte de ella se pierde en la misma antena, es decir, se queda en la antena. Las pérdidas óhmicas se deben principalmente a la resistividad del material de la antena, pero también hay otras causas. La resistencia de entrada es, por tanto, la suma de de la resistencia de radiación y de la de pérdidas óhmicas:

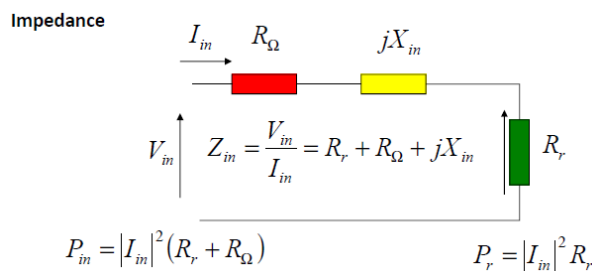
$$R_{in} = R_r + R_{\Omega}$$

Interesa que la R_r sea la máxima posible.

- La eficiencia de la antena es definida como la proporción entre la potencia radiada P_r y la entregada P_{in} , o, lo que resulta equivalente, la relación entre la resistencia de radiación y la de entrada (suma de la de radiación más la de pérdida óhmicas).

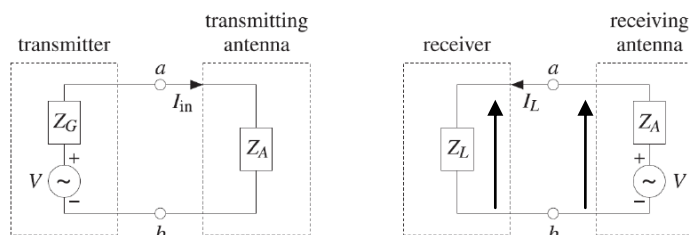
$$\eta_l = \frac{P_r}{P_{in}} = \frac{R_r}{R_r + R_{\Omega}}$$

- Circuito equivalente de una antena:



En cuanto a X_{in} , interesa que, si no es cero, sea la conjugada del generador, para que se produzca Adaptación de Impedancias, lo que significaría la máxima transferencia posible de potencia.

- En Transmisión y Recepción los circuitos equivalentes de la antena conectada al transmisor o al receptor son, respectivamente:



- En Rx, V es la tensión en circuito abierto de la antena receptora (V_{CA}), que aparece cuando no hay carga conectada.
- V depende del campo E o de la densidad de potencia según la posición de la antena y de las características de la antena y excitación de la misma.
- Si Z_A es distinta de Z_L^* , entonces aparecerán algunas pérdidas por desadaptación que reducirán la potencia en la carga.
- Y es que, en Tx, para que la transferencia de potencia sea la máxima, $Z_G=Z_A$. Se trabajará con un valor de 50Ω , el cual sería lo ideal, aunque la realidad muestra que, debido a los cambios en la frecuencia, aparece una parte imaginaria. Por ejemplo, una Z_A de $49 \Omega + 1j\Omega$.
- En Rx, lo que parece un generador es, en este caso, la antena, ya que la tensión provoca que la potencia se disipe en la antena. Es decir, sin carga, sería la tensión en bornes que habría en la antena.
- En el caso en que $Z_G=Z_A$ o $Z_L=Z_A$, se aprecia que el circuito se comporta como un divisor de tensión. Y, teniendo en cuenta que se da adaptación de impedancias, la forma de trabajar y resolver el problema sería la siguiente:

$$V_L = \frac{V_{CA} \cdot Z_L}{Z_L + Z_A}$$

Como $Z_L = Z_A$ (adaptación de impedancias), las llamaremos "R". Ante esto, la potencia será: $P_L = \frac{V_L^2}{R} = \frac{V_{CA}^2}{4R}$. Por lo que, si existe adaptación de impedancias: $V_L = \frac{V_{CA}}{2}$.

- La impedancia es fácilmente medible. Para ello se emplea el Analizador de Redes. Éste genera una señal de una potencia determinada y mide a ver cuánta potencia la envuelve. Ante esto, emplea una relación y calcula la impedancia, basándose en la reflexión, y utilizando el coeficiente S_{11} . Analíticamente, la impedancia puede ser obtenida, como se acaba de citar, mediante el coeficiente de reflexión de la manera siguiente:

$$\rho = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$$

Normalmente, el analizador de redes nos ofrece la medida de la impedancia de entrada (Z_{in}) directamente.

- La impedancia de la antena es uno de los parámetros más importantes. Indica si un dispositivo puede ser una antena o no.
- Otras medidas, relacionadas con el coef. Reflexión ρ y, consecuentemente, con Z_{in} , son:

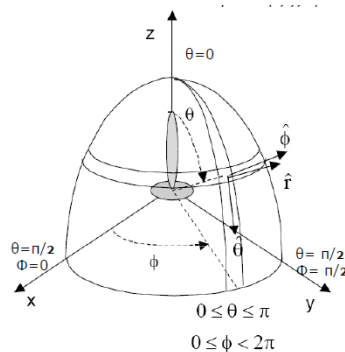
- Pérdidas de retorno: $-20\log(\rho)$
- Coeficiente de Onda Estacionaria(COE/VSWR):

$$VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

- En Transmisión, una desadaptación entre el transmisor y la antena puede provocar un daño importante en el equipo debido a la potencia reflejada. Así que una buena adaptación se consigue con el factor crítico.
- ¿Cuándo consideramos que una antena está bien adaptada? Es decir, que $Z_L = Z_A$. El límite se sitúa en unos -10 dB de coeficiente de reflexión es lo aceptable. Aunque, lo conveniente es que sea menor a esta cifra. Si fuera mayor que 10 dB se consideraría mala adaptación.

▪ **Análisis del Sistema de Coordenadas:**

- En primer lugar, se ha de elegir un sistema de coordenadas para seleccionar una dirección. Atendiendo a la forma de radiación de las antenas, el esférico es el sistema más adecuado. Este sistema depende de 3 parámetros: (r, θ , ϕ). Donde, sólo dos de ellos son necesarios para definir una dirección: (θ , ϕ). Es decir, “r”, distancia desde el punto de referencia hasta el origen, no influye en las características de la antena. θ , por su parte, nos aporta el ángulo del vector desde el origen hasta nuestro punto con el eje z. Mientras que ϕ , representa el ángulo de proyección del punto eje, con el eje x. Gráficamente:



- Las ondas salientes de la antena, surgidas de su radiación, son esféricas, pero, a una distancia lo suficientemente lejana, se comportan como ondas planas. Esto muestra la relación entre el campo \vec{E} y \vec{H} , incluidos en el plano donde la onda esférica se ve plana:
 - Son mutuamente perpendiculares.
 - Perpendiculares a la dirección de propagación “ \hat{r} ”.
 - Sus módulos están en fase y se relacionan con la impedancia intrínseca del medio ($\eta=120\pi$ en el vacío o aire) de la forma:

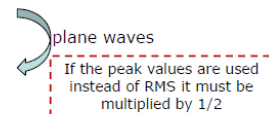
$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \eta$$
- La distancia donde los campos radiados son considerados como ondas planas y donde sus parámetros de radiación son constantes con la distancia depende de la antena y de la frecuencia. La región del espacio desde esa distancia en cuestión es conocida como “campo lejano” en la región de radiación.
- Un valor aproximado para la distancia mínima que asegura la condición de campo lejano es:

$r > \frac{2D^2}{\lambda}$, donde D es la máxima dimensión de la antena.

- Por ello, para la medición de las antenas es necesario asegurarse de un alejamiento suficiente respecto a éstas. Es decir, a una distancia donde las características de la antena no varíen demasiado. Esta distancia puede aproximarse a $\lambda/2$ aunque se suele considerar “campo lejano” a partir de λ . No obstante, es preferible usar la fórmula anterior para su cálculo.
- **La densidad de flujo por unidad de área, o densidad de potencia radiada**, se obtiene de los campos eléctrico y magnético como (en rms):

$$\bar{W}(\theta, \phi) = \bar{S}(\theta, \phi) = \text{Re}(\bar{E} \times \bar{H}^*) \text{ W/m}^2$$

$$\bar{S}(\theta, \phi) = \frac{1}{\eta} \left[|\bar{E}_\theta(\theta, \phi)|^2 + |\bar{E}_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \hat{r}$$



En la segunda expresión, podemos observar cómo se emplean las 2 componentes del campo eléctrico, en θ y en ϕ . Además, se observa que la dirección seguida por \vec{S} es la de propagación. Y, como se aprecia en el cuadro, si se emplean valores de pico, hay que utilizar 1/2 en la expresión, porque, en caso contrario, los valores serían excesivamente altos. Pero, nosotros, normalmente trabajaremos en RMS, es decir, valores eficaces.

- Este vector es el valor RMS del **vector de Poynting**.
- Además, la potencia radiada total se puede obtener integrando el flujo de potencia a través de las superficie (con la esfera se da la forma más sencilla), que encierra la antena:

$$P_r = \iint_s \bar{S}(\theta, \phi) \cdot d\vec{s}$$

Esta integral representa la suma de la potencia radiada, a través de la medición de las diferentes áreas radiadas alrededor de la antena en los diferentes trozos afectados.

▪ **Diagrama de Radiación o Diagrama de Antena:**

- Gráfico en 3D de una de las siguientes magnitudes:
 - Intensidad del campo eléctrico normalizada:

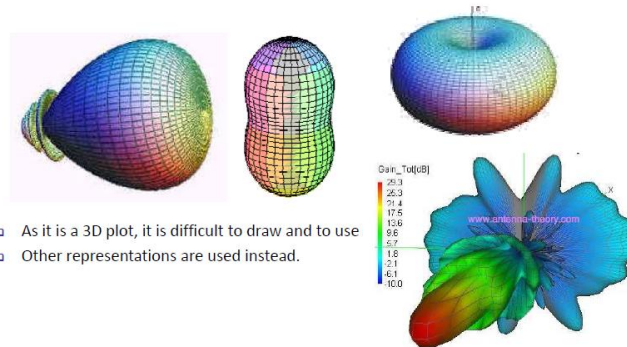
$$20 \cdot \log \frac{|\bar{E}(\theta, \phi)|}{|\bar{E}_{\max}|}$$

- Densidad de potencia radiada normalizada:

$$10 \cdot \log \frac{S_{rad}(\theta, \phi)}{S_{rad \max}}$$

Representa el valor máximo obtenido en cada una de las radiaciones, respecto al valor máximo. En el momento que encontremos la radiación máxima, por tanto, ha de llevarnos a 0 dB.

- Debido a las propiedades de las ondas planas, ambos diagramas son exactamente lo mismo, incluso el campo magnético puede ser también empleado con el mismo resultado.
- En resumen, el diagrama de radiación es un gráfico que nos permite visualizar dónde la antena transmite o recibe potencia.
- Ejemplos:

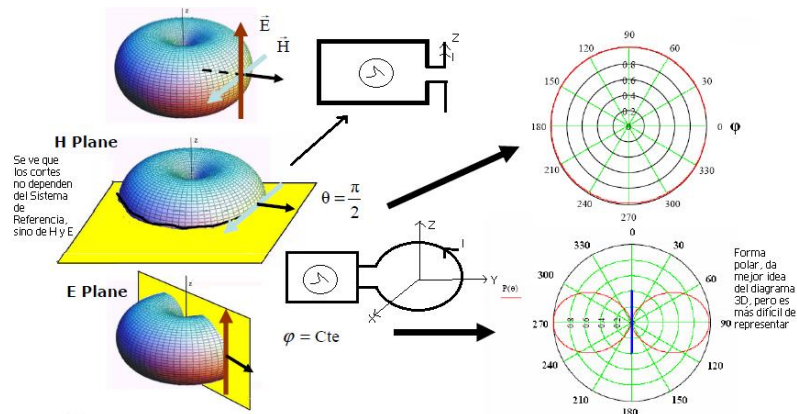


- As it is a 3D plot, it is difficult to draw and to use
- Other representations are used instead.

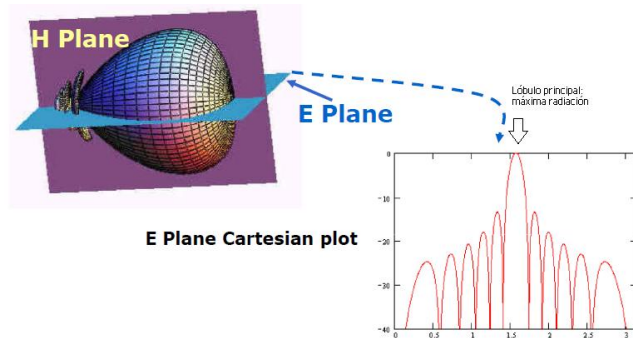
El primero de los dibujos se trata de una antena direcciva. Tanto el segundo, como el tercero, de una omnidireccional.

- Sin embargo, el Diagrama de Radiación no es lo mismo que los **Cortes al Diagrama de Radiación**, que son los que vamos a emplear.
- En muchos casos resulta más sencillo y suficiente la representación de dichos cortes. Los cortes más usuales son: paralelos (θ constante, varía ϕ respecto de z) y meridianos (ϕ constante, variando θ).
- Para la mayoría de las antenas (linealmente polarizadas) hay dos planos principales:
 - Plano E: definido por la dirección de máxima radiación (la dirección de polarización) y por el vector campo eléctrico en esa dirección (corte al plano E).
 - Plano H: definido por la dirección de máxima radiación y por el vector campo magnético en esa dirección (corte al plano H).
 - Los dos planos son perpendiculares (porque E y H lo son) y su intersección es la dirección de máxima ganancia (porque así es cómo ellos son definidos).
- Los cortes pueden ser representados en gráficos polares o cartesianos:
 - Plano polar: mostrado dentro de un círculo, el ángulo representa la dirección del espacio y el radio es la magnitud a representar. Tiene la ventaja de que la información direccional es fácilmente interpretable, pero los valores son difíciles de extraer.
 - Plano cartesiano: la magnitud del diagrama se representa en el eje y, mientras que el eje x representa el ángulo variable. Este tipo de representación es menos clara visualmente, pero los valores son fácilmente obtenibles.

- Ejemplos: antena de dipolo puesta en el eje z, donde las corrientes del dipolo han de ser perpendiculares.

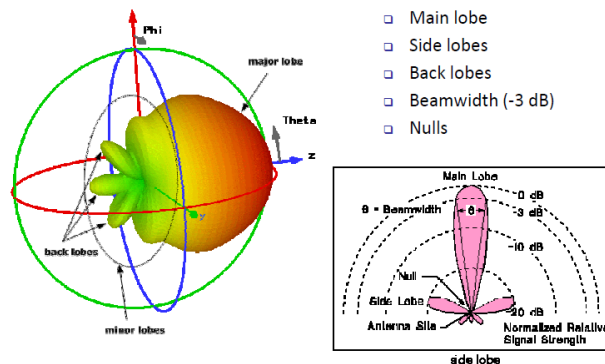


- Ejemplo, plano cartesiano:



- Clasificación de antenas de acuerdo al Diagrama de Radiación:
 - Antena isótropa: antena ideal que radia por igual en todas las direcciones. Su directividad es, por tanto, la unidad. Su Diagrama de Radiación es una esfera (sin hueco) y los cortes son todos círculos. No existen, son ideales. Interesarían, por ejemplo, para los móviles, que cogieran la máxima potencia de señal posible en cualquier dirección.
 - Antena Omnidireccional: se trata de la antena cuyo diagrama de radiación tiene simetría (de radiación) alrededor del eje de revolución (el diagrama 3D puede obtenerse por la revolución de ese corte, es decir, dándole vueltas). Por ejemplo, un dipolo.
 - Antena Directiva: el resto de las antenas, no es Isótropa ni Omnidireccional. Existe una dirección concreta en la cual la antena siempre radia más potencia que en el resto.
 - Cabe destacar que, si la antena es físicamente igual, también radia igual. Pero, por ejemplo, al conectarla con un cable, ya no es exactamente igual, por lo que deja de ser completamente Omnidireccional.
- Parámetros extraídos del Diagrama de Radiación (dan una idea de cómo radia la antena):
 - Lóbulo: porción del Diagrama limitada por regiones de radiación más débil.

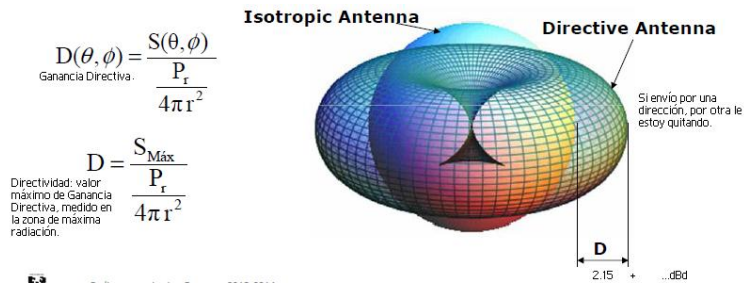
- Lóbulo principal: el lóbulo que contiene la dirección de máxima radiación.
- Lóbulos secundarios: no son el lóbulo máximo.
- Lóbulos laterales: justo los adyacentes al lóbulo principal, suelen coincidir con los secundarios.
- Lóbulo trasero: opuesto a la dirección de radiación del principal.
- Nivel de lóbulos secundarios (SSL): el nivel más alto de lóbulo secundario con respecto al nivel del principal. Es decir, la relación entre el principal y el resto. Será mejor cuanto más alta sea la frecuencia.
- Ancho de haz a potencia media (HPBW) : también llamado ancho de haz a 3 dB (3 dB BW): ángulo entre dos puntos a potencia media (-3 dB). Da una indicación sobre la directividad.
- Ancho de haz entre nulos (Null-Null BW): 2.25HPBW (valor muy pequeño).
- De adelante-atrás : relación entre el lóbulo principal y el trasero.
- Gráficamente:



Donde, en la imagen inferior derecha, se aprecia, por ejemplo, que relación del lóbulo principal con el secundario es de -20 dB.

▪ **Ganancia Directiva, Directividad y Ganancia:**

- La **Ganancia Directiva** se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que una antena isótropa radiaría bajo las mismas condiciones (misma distancia y potencia total radiada). Es decir, la relación entre la potencia radiada que radiaría una antena isótropa y la que radia nuestra antena.
- La **Directividad** es la ganancia directiva en la dirección de máxima radiación. Algunas veces, la directividad también se emplea para hacer referencia a la Ganancia Directiva.



- o La **Ganancia** de la antena tiene una definición similar a la Directividad, sólo que, en lugar de comparar con una antena isótropa radiando la misma potencia, la comparación se efectúa con la densidad de potencia de la antena isótropa que es entregada trabajando con la misma potencia. Es decir, se refiere, no a la potencia radiada, sino a la entregada. Esto es, se diferencian en las pérdidas de la antena, que aquí son incluidas. Como la potencia entregada es ligeramente más grande que la radiada (debido a las pérdidas) la ganancia es algo menor que la Directividad. Por tanto, se aprecia que la Directividad hace referencia a la antena ideal, mientras que la Ganancia presta atención a la antena real.

$$G = \frac{S_{Max}}{\frac{P_{in}}{4\pi r^2}} \quad P_r = P_{in} \cdot \eta_l \quad \Rightarrow \quad G = D \cdot \eta_l$$

- o En algunos casos, las pérdidas son muy pequeñas, casi despreciables, por lo que se puede considerar que la Ganancia y la Directividad son prácticamente iguales.
- o Tanto la Ganancia como la Directividad son frecuentemente expresadas en dB, y como están relacionadas con la antena isótropa, se añade una "i": dBi.
 - A veces (especialmente para las antenas conductoras), la Ganancia o Directividad de la antena, se compara con un dipolo $\lambda/2$ y expresado en dBd (densidad de potencia media radiada por un dipolo $\lambda/2$).
 - La Directividad de un dipolo $\lambda/2$ es 1.64 o 2.15 dBi. Por tanto: dBd = dBi + 2.15.
 - Siempre usaremos dBi, pero a veces se emplean dB, en cuyo caso se entiende que son dBi.
- o Ejemplos Reales:

TERRESTRIAL TV ANTENNAS
 UHF
FAN Series

UHF antennas for easy installation, obtaining important time economies and optimum electrical characteristics. They are designed to receive both vertical or horizontal polarization signals. The wide range of models allows to cover a large variety of existing signals.

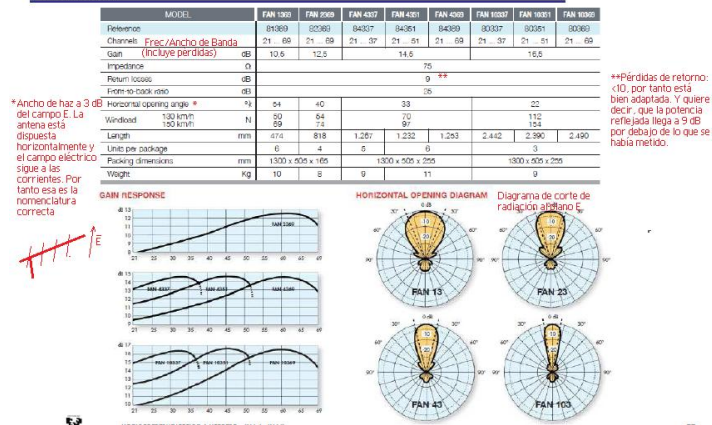
APPLICATION

Analogue and Digital Terrestrial TV Installations, both individual or community.

CHARACTERISTICS

- Quick and easy antenna mounting since ergonomical wing nuts are provided.
- Tool-less set up of the reflectors.
- A built-in broadband symmetrizer guarantees life-long performance of the antenna.





■ **PIRE (EIRP):**

- **Definición:** El PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) es la potencia que debería radiar una antena isotrópica para conseguir la misma densidad de potencia que la que produce una antena directiva en la dirección de máxima radiación. O sea, la potencia que ha de introducirse en el generador, que siempre es mayor que la radiada.
- El efecto de la Direccionalidad es que en algunas direcciones se tiene una ganancia de potencia relativa al radiador isotrópico, compensada en otras direcciones con niveles de pérdidas más bajos que los del radiador isotrópico, porque el total de potencia radiada debe ser el mismo.
- El PIRE se calcula como el producto de la potencia radiada por la Directividad (o la potencia entregada por la Ganancia).

$$D(\theta, \phi) = \frac{S(\theta, \phi)}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} \Rightarrow S(\theta, \phi) = \frac{D(\theta, \phi) \cdot P_r}{4\pi r^2} = \frac{EIRP(\theta, \phi)}{4\pi r^2} \quad \boxed{EIRP = D \cdot P_r}$$

$$G(\theta, \phi) = \frac{S(\theta, \phi)}{\frac{P_m}{4\pi r^2}} \Rightarrow S(\theta, \phi) = \frac{G(\theta, \phi) \cdot P_m}{4\pi r^2} = \frac{EIRP(\theta, \phi)}{4\pi r^2} \quad \boxed{EIRP = G \cdot P_m}$$

A modo de ejemplo, puede destacarse el WiFi, configurado para una PIRE máxima.

■ **PRA (ERP):**

- **Definición:** La PRA (Potencia Radiada Aparente) se trata de la potencia que debería radiar un dipolo $\lambda/2$ para dar la misma densidad de potencia que la que necesita nuestra antena. Es decir, para conseguir la misma densidad de potencia que produce una antena directiva en la dirección de máxima radiación.
- Se aprecia que es la misma definición que la PIRE, pero empleando un dipolo $\lambda/2$ como referencia, en vez de una antena isotrópica.
- Como la Directividad del dipolo $\lambda/2$ es 2.15 dB:
PIRE = PRE + 2.15 dB

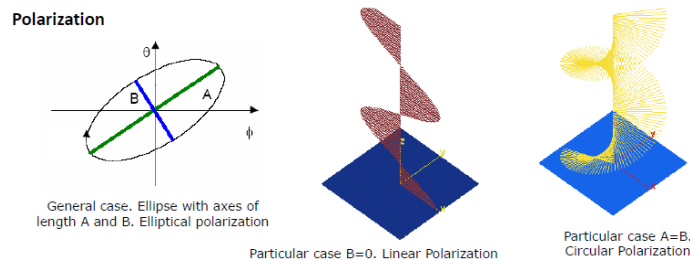
■ **Polarización:**

Ahora se definirán los campos E y H con su dirección:

- Los campos electromagnéticos radiados por una antena son vectores y, entonces, su módulo (con los parámetros vistos hasta ahora) y su dirección deben ser definidos. La Polarización es el parámetro que nos

permite determinar la dirección de los campos E y H, o, como mínimo, determinar cómo varían a través de la dirección de propagación con el tiempo.

- Actualmente, sólo es necesario definir la dirección de uno de los vectores (el campo E, cuya forma es habitualmente helicoidal), porque el otro (H) se define siendo una OEM plana.
- Generalmente, si vemos cómo el vector campo eléctrico envuelve con el tiempo desde un punto de observación fijo, nosotros veremos que describe una elipse.
- Se dan dos casos particulares cuando la elipse degenera en una línea recta, uno de los semiejes de la elipse es cero (polarización lineal), o en un círculo (polarización circular), donde los dos ejes son iguales.
- La polarización de una antena es, concretamente, la polarización de sus ondas radiadas.
- Ejemplos gráficos de los casos mencionados:



- En el caso de la polarización circular, es necesario definir el sentido de giro: Si el sentido de giro coincide con las agujas del reloj, la polarización es circular a derechas. Si el sentido de giro es contrario a las agujas del reloj, la polarización es circular a izquierdas. El mismo convenio se aplica a las ondas con polarización elíptica.
- Normalmente, las antenas son diseñadas para tener polarización lineal o circular. Esto se debe a la gran variedad de polarizaciones elípticas existentes. Por este motivo, resulta más fácil con lineales o circulares, que son más concretas, y así, se normalizan los diseños.
- Las antenas han de tener la misma polarización tanto en Transmisión como en Recepción, sino ocurren algunas pérdidas y/o problemas:
 - Por ejemplo, polarización circular a izquierdas en Rx y a derechas en Tx, o, viceversa, no se recibe nada, sólo algo de ruido.
 - Otro ejemplo, polarización circular en Tx y lineal en Rx, o, viceversa, sólo recibe una componente, vertical u horizontal, según el caso. Es decir, se recibe la mitad de la potencia transmitida y que se esperaba que llegase.

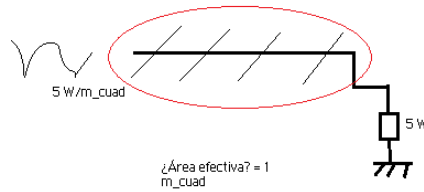
▪ **Área Efectiva o Apertura:**

- El área o apertura efectiva, A_{ef} , de la antena se define para que sea el área que, cuando es interceptada por la densidad de potencia incidente S, proporciona la potencia recibida P_L :

$$P_L = S \cdot A_{ef} \rightarrow S = \frac{P_L}{S}$$

Interesa que el Área Efectiva sea, cuanto mayor, mejor.

Ejemplo:



- El Área Efectiva no es igual al área física de una antena. Por ejemplo, las antenas lineales no tienen ninguna característica pareja al área física. Para las antenas parabólicas o las bocinas, por otro lado, el área efectiva es típicamente una fracción del área física, sobre un 55-65 % en parabólicas, y un 60-80% en bocinas.
- Normalmente el Área Efectiva se define en condiciones óptimas, esto es:
 - Polarización adaptada.
 - Adaptación de impedancias.
 - Antena sin pérdidas.
 - Dirección de máxima ganancia: Tx y Rx dan y reciben la máxima potencia posible.
- El Área Efectiva se relaciona con la Directividad (son directamente proporcionales): **FÓRMULA IMPORTANTE**

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot D$$

Si empleáramos la Ganancia en lugar de la Directividad (D), habría que tener en cuenta las pérdidas.

▪ **Factor de Antena o Factor K:**

- En algunos casos, resulta interesante ser capaz de obtener el valor del campo E incidente desde el nivel de voltaje recibido, medido en voltios en la carga (normalmente 50 Ω), por ejemplo, usando el analizador de espectros como medidor de campo. Y es que, dicho analizador permite la medida del campo E. El parámetro que relaciona esas dos magnitudes (Campo E y Voltaje) es el Factor de Antena (AF o K):

$$|E| = V_L \cdot K \Rightarrow AF = K = \frac{|E|}{V_L}$$

$$K(dB) = 20 \log \frac{|E|}{V_L} dBm^{-1}$$

The units of K are m⁻¹ or dB referred to m⁻¹

□ If the antenna is matched to the load:

$$P_L = \frac{V_L^2}{R_r} = \frac{|E|^2}{\eta} A_{ef} \Rightarrow K = \left(\frac{\eta}{R_r} \cdot \frac{1}{A_{ef}} \right)^{1/2}$$

□ And for R_r=50 Ω $K = \frac{9.73}{\lambda\sqrt{D}}$

Se aprecia que se usa 20log, ya que hablamos de campos, no de potencia.

Por otra parte, una antena (muy directiva) será mejor cuanto menor sea el factor K.

- Fórmula de Espacio Libre:

- Hasta ahora se ha visto la antena desde un punto de vista de Transmisión o de Recepción. Ahora se estudiará por completo el espacio libre del sistema Transmisor-Receptor.
- Para diseñar un sistema de radio es necesario hacer un balance de potencia, de manera que en el receptor haya suficiente potencia para alcanzar la relación mínima C/N (Portadora/Ruido) necesaria para una correcta recepción.
- La densidad de potencia radiada por una antena isótropa es: $S = \frac{P_r}{4\pi r^2}$
- Las antenas reales presentan un comportamiento directivo, en este caso, la densidad de potencia se obtiene como el de una isótropa, pero usando la PIRE: $S = \frac{D \cdot P_r}{4\pi r^2} = \frac{G \cdot P_{in}}{4\pi r^2} = \frac{PIRE}{4\pi r^2}$; donde, P_{in} es la potencia entregada. Y, si la eficiencia es del 100%, la P_r (potencia radiada) sería igual que la P_{in} .
- La antena receptora transferirá parte de la densidad de potencia a la potencia de la carga:

$$P_L = S A_{\theta R} = \frac{P_r}{4\pi r^2} D_T A_{\theta R} = \frac{P_r}{4\pi r^2} D_T D_R \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad \boxed{\frac{P_L}{P_R} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 D_T D_R}$$

Se aprecia que, cuanto mayor sea el área efectiva, más potencia habrá en la carga. También se observa que, cuanto mayor sea la directividad, mayor será la densidad de potencia, ya que la antena estará apuntando más próxima a la dirección correcta.

- Pérdidas en el espacio libre:

- Free Space Losses: $L_0 = L_{FSL} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 \quad L_{FSL} (dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)$

$$P_L - P_R = -L_{FSL} + D_T + D_R - L \quad (dB)$$

Siempre se van a tener pérdidas de espacio libre. Cabe destacar que habrá más pérdidas cuanto más lejos se esté. Además, cuanto mayor sea la frecuencia, más pérdidas de espacio libre se encontrarán. No obstante, aunque la frecuencia aumente, se puede seguir empleando dicha antena. Y es que, a mayor frecuencia, las antenas son más directivas, por lo que estas pérdidas se compensan para poder proseguir con su uso.

- En la expresión, el término "L" tiene en cuenta otras pérdidas, como pérdidas óhmicas, pérdidas debidas a la polarización, a efectos atmosféricos (lluvia, viento...) que producen atenuación...
- Algunas Figuras:
 - Atendiendo a las pérdidas de espacio libre de una antena isótropa y una separación entre Transmisor y Receptor de (aprox.) una longitud de onda (λ metros), la atenuación es aproximadamente 22 dB.
 - Las pérdidas de enlace del Satélite Geoestacionario son unos 180-200 dB (dependiendo de la frecuencia).
 - Las pérdidas son logarítmicas: unos 20 o 22 km de distancia no tienen una diferencia muy relevante en muchos casos ($20 \log 22/20 = 0.8$ dB).

- Siguiendo con el ejemplo: 6 dB se dan a 40 km. (desde 20 a 40 km...).

Link Budget (Balance de Potencias):

- Para asegurar potencia suficiente de recepción.
- Se trata del seguimiento (cuenta) de todas las ganancias y pérdidas desde el Transmisor, a través del medio, hasta el Receptor.
- Para la señal transmitida tiene en cuenta tanto la atenuación debida a la propagación como la ganancia de las antenas, la línea de alimentación y las diversas pérdidas.
- Como las ganancias del canal varían aleatoriamente, cuando éstas se debilitan, son tenidas en cuenta para añadir cierto margen dependiendo de la severidad de los efectos que hayan surgido.
- El objetivo de calcular este balance de potencias es asegurar que el nivel de señal es suficientemente alto en recepción.

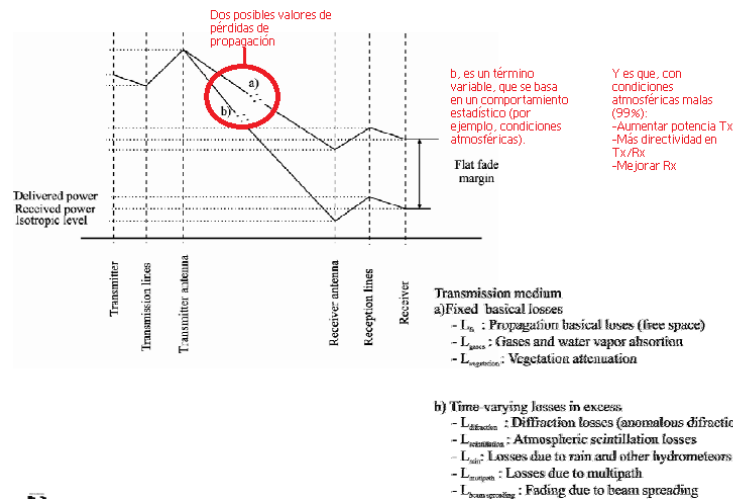


$$P_L - P_R = -L_{FSL} + D_T + D_R - L \quad (dB)$$

$$P_L - P_R = -L_{FSL} + G_T + G_R - L \quad (dB)$$

- Gráficamente:

Se dibuja cómo varía la potencia:



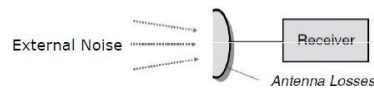
Ruido e Interferencia

- Ruido:
 - **Definición:** El ruido en las radiocomunicaciones es definido por la ITU-R como un fenómeno electromagnético tiempo-variable que tiene componentes en el rango de radio-frecuencia, aparentemente sin conllevar información y que puede estar superpuesto o combinado con la señal deseada.
 - El ruido está presente en todos los sistemas y equipamientos de comunicación, incluyendo los sistemas de radiocomunicación.
 - Es un factor crítico si la potencia recibida es baja: más importante que la potencia de ruido es la relación C/N (portadora/ruido).
 - Para un buen diseño de un sistema de recepción, el valor más importante de ruido se da en las primeras etapas de Recepción, es decir, a la entrada del receptor, debido a la baja potencia en esta etapa (pW).

- **Fuentes del ruido:**
 - **Ruido externo:** la antena de recepción obtiene señales indeseadas.
 - **Ruido interno:** todos los componentes en la cadena de recepción añaden cierto ruido, mayor para las aplicaciones activas.
- A menudo el ruido es **AWGN** (Aditivo, Blanco y Gaussiano):
 - **Aditivo:** la potencia de las diferentes fuentes de ruido se añade directamente (independiente).
 - **Blanco:** su densidad de potencia espectral es plana (constante) en la banda de frecuencia de interés.
 - **Gaussiano:** su valor instantáneo es una variable aleatoria que sigue una distribución Gaussiana de media cero y varianza σ^2 (potencia media).

- Ruido externo:

- Ruido en una antena:



- Dos componentes:

- Ruido externo (ruido de radio o ruido del cielo y de la tierra). Una Temperatura de ruido de la antena se emplea para calcular la potencia de ruido recibida por la antena:

$N = kT_a B$; y es que, con la T_a de la antena ya se puede obtener el ruido. Donde, k es la constante de Boltzmann.

- Este ruido se atenúa por las pérdidas de la antena:

$$N = kT_a B \eta_1$$

- El ruido debido a la antena (pérdidas de la antena). Tiene el mismo efecto que un atenuador:

$$N = kT_{amb} B (1 - \eta_1)$$

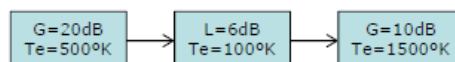
- La potencia total de ruido a la salida es:

$$N = kT_a B \eta_1 + kT_{amb} B (1 - \eta_1)$$

La T_a depende mucho de la frecuencia. Es más bajo a frecuencias altas, y más alto el ruido a frecuencias bajas, haciendo más importante el primer término.

- Ruido en la Cadena de Recepción:

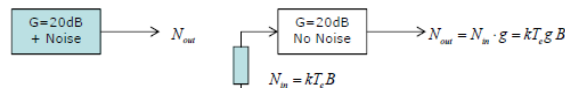
- Cada elemento de la cadena tiene dos efectos en el ruido:
 - Atenuar o amplificar el ruido entrante desde las etapas anteriores (ganancias o pérdidas).
 - Añadir algo de ruido generado internamente por el elemento.



- El ruido añadido por cualquier elemento puede ser cuantificado usando cualquiera de los siguientes parámetros:

- Temperatura equivalente de ruido: T_e
- Figura o factor de ruido: f o F (dB)
- Potencia de Ruido: N

- Temperatura Equivalente de Ruido: T_e
 - Es la temperatura de una resistencia situada a la entrada que genera la misma potencia de ruido a la salida como el elemento (pasivo).



Se ve en las expresiones, que la g se refiere a la entrada, para tener en cuenta la ganancia, ya que, a la salida, no se tiene en cuenta. Se trata, asimismo, de la ganancia del amplificador, atenuador, divisor...

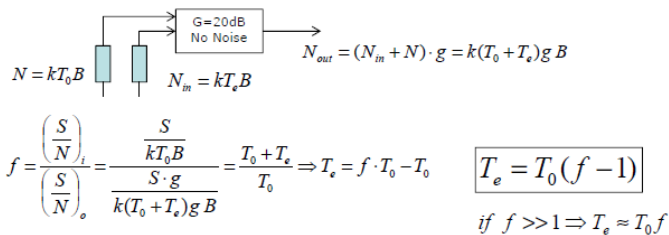
- Si conocemos la T_e , el ancho de banda, y la ganancia, también podemos obtener la potencia de ruido a la salida.
- Elemento pasivo: atenuador o equivalente, donde la T_e puede ser obtenida de su atenuación de la siguiente manera:

$T_e = T_{amb} \cdot (l - 1)$; Donde, $l > 1$, ya que se da en lineal, y, por tanto, no puede ser negativa. T_e , siempre a la entrada.

Cabe destacar que un elemento pasivo no puede tener pérdidas (atenuador, adaptador de impedancias...

Sin pérdidas, atenuación es 1 en lineal, y 0 en dB, por lo que, el ruido sería 0.

- Figura o Factor de Ruido:
 - El Factor de Ruido es la relación de S/N a la entrada y a la salida de un elemento cuando la potencia de ruido a la entrada es: $N = kT_0 B$; Con $T_0 = 290^\circ K$
 - Es una medida de calidad del elemento. Mejor cuanto más próximo a 1 esté (nunca menor que 1).
 - A menudo dado en dB como: $F (dB) = 10 \log (f)$ (Figura de Ruido).
 - Es otro método de cuantificar el ruido interno. T_e puede obtenerse del Factor de Ruido como se ve aquí:



Hay que reseñar que el amplificador siempre estropea la relación S/N, dependiendo de la calidad del aparato la cantidad en cuestión. En el caso de que $f \gg 1$, el aparato será muy malo.

- Quando la temperatura ambiente es la principal referencia, el Factor de Ruido de un atenuador es igual a su atenuación:

$$T_e = T_{amb} (l - 1) \quad \text{if } T_{amb} = T_0 \Rightarrow T_e = T_0 (l - 1) \Rightarrow f = l$$

- Interferencia:
 - Definición:** definida por la ITU como el efecto de la energía indeseada debida a una emisión, o a una combinación de emisiones, radiaciones, o inducciones

sobre la recepción en un sistema de Radiocomunicación, manifestada por cualquier degradación en su rendimiento, malinterpretación, o pérdida de información que podría extraerse en ausencia de tanta energía no deseada.

- En algunos aspectos, se parece al ruido, porque ambos producen una degradación en el rendimiento del receptor, pero el ruido es incorrelado a la señal, mientras que, en el caso de la interferencia, esto no siempre es cierto.
- El rendimiento del sistema en general depende de las relaciones C/N y C/I. Si el ruido es el efecto dominante, la relación C/N puede emplearse. En cambio, si la interferencia es el efecto principal, se usa la relación C/I.
- En algunos casos, la interferencia es considerada como ruido y la relación que se usa es C/(N+I).
- Las técnicas para disminuir el nivel de Interferencia dependen de la causa que la provoca (cambiar la polarización de la antena o el diagrama de la antena, filtros de entrada, aislamiento del receptor...).

Medidas de la Calidad

- Analógico: S/N o SNR (Relación Señal a Ruido). Esta relación se da en cuanto a la señal demodulada, mientras que, la C/N, se da en la señal modulada. Se necesitan unos 40 dB para recibirla correctamente en analógico.
- Digital:
 - Relacionados con la Modulación:
 - **MER:** (Modulation Error Ratio). Es una buena indicación de la relación C/N o CNR. Si exigen un MER de tantos dB, la relación C/N ha de ser algo mayor.
 - **EVM:** (Error Vector Magnitude): muestra la amplitud del error.



Y es que, son permisibles ciertos errores, ya que es posible arreglarlos posteriormente en decodificación.

- Relacionado con el error: Bit Error Ratio: **BER**. Relación entre los bits erróneos y los bits totales. Si el número de bits recibidos es lo suficientemente alto, también se considera que es la probabilidad de error.
 - Otras medidas de error: FER (Frame Error Ratio), ESR (Error per Second Ratio), Block Error Ratio...
 - Ejemplo de uso del BER:
1 BER a una Vb=1 Mbs (10^{-6}). Por lo que, al menos, hay que estudiar 10^6 bits, y será necesario esperar un segundo cada vez que se estudien, ya que: $T = \frac{10^6 \text{ bits}}{1 \cdot 10^6 \text{ bits/s}} = 1 \text{ s.}$

- Probabilidad de Error:

- Asumiendo que se emplea el Código Gray en la modulación, el “bit error rate” se define como:

$$P_{eb} = k \cdot G(d/\sigma)$$

- D es la distancia de decisión en los puntos de las constelaciones.
- K es una constante que depende del tipo de modulación.
- σ es la potencia de ruido Gaussiano blanco aditivo normalizado en el receptor: AWGN.
- $G(t)$ es la función de distribución de la Complementaria Gaussiana, comúnmente conocida como “Cola de la Gaussiana”.

$$G(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp(-u^2/2) du \quad G(t) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi t}} \exp(-t^2/2)$$



Cola de la Gaussiana

- La relación d/σ puede normalizarse en términos de la relación entre la energía de bit y la densidad de ruido: e_b/n_0 .

- En esquemas de modulación con amplitudes de envolvente variables, la energía por bit se referirá a la amplitud máxima de la portadora modulada, A.

$$e_b = \frac{A^2}{2V_b} \quad ; \quad n_0 = k \cdot T_0 \cdot f_r \quad (\text{DEP del ruido, para que fuera la potencia de ruido debería incluir el ancho de banda, B}).$$

Donde, V_b es el “bitrate” de la señal de radio; T_0 , es la temperatura de referencia (290° K); k, es la constante de Boltzmann; f_r , es el factor de ruido del receptor.

Cabe destacar, en cuanto a la energía por bit, que la energía representa la potencia por el tiempo.

- La probabilidad de error puede escribirse también en términos de la relación entre la potencia media de la señal recibida y el ruido equivalente a la entrada del demodulador (C/N).

- Relación entre C/N y e_b/n_0 :

$$C = \frac{e_b}{T_b} \quad \text{y} \quad N = \frac{n_0}{T_s}, \quad \text{donde, en este segundo caso, el ancho de banda sería } BW = \frac{1}{T_s}, \text{ si está ajustado al mínimo de Nyquist.}$$

Por tanto: $C/N = \frac{C}{N} = \frac{e_b \cdot T_s}{n_0 \cdot T_b} = \frac{e_b}{n_0} \cdot \log_2 M$, donde, $\log_2 M = T_s/T_b$, representa el número de bits/símbolo. Por ejemplo, 2, para el caso de QPSK.

- Para sistemas M-QAM, si “r” es el valor máximo de la relación de potencia media de la señal recibida, y ya que c/n es el valor medio de c, todo ello, por consiguiente, puede escribirse:

$$\frac{C}{N} = \frac{e_{bmax} \cdot 1}{n_0 \cdot r} \cdot \log_2 M$$

- En la mayoría de los sistemas en la práctica, el ancho de banda equivalente del receptor, B_{eq} , es más amplio que el ancho de banda de Nyquist, y la relación

c/n se especifica, generalmente, para dicho ancho de banda equivalente $((C/n)_{eq})$, aportado por el equipamiento fabricado:

$$W = \frac{e_b}{n_0} = (C/n)_{eq} \cdot \frac{B_{eq}}{V_b} \quad ; \quad (C/n)_{eq} = \frac{e_b}{n_0} \cdot \frac{V_b}{B_{eq}} \quad ; \quad V_b, \text{ es el "bitrate" de}$$

la señal de radio. Cabe destacar que, con constelaciones de orden muy altas, se protege mejor la señal y hay que corregir menos.

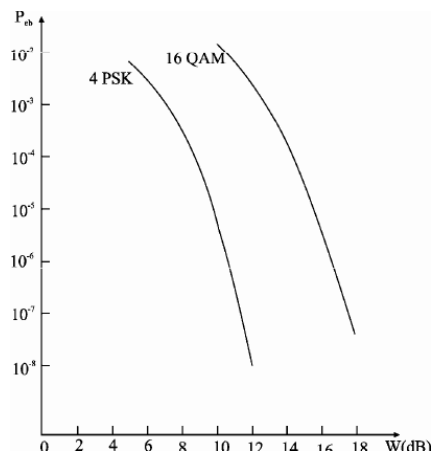
- Bit error rates en condiciones ideales:

Modulation scheme	Bit error rate
Binary PSK	$P_{eb} = G(\sqrt{2w})$
Multilevel PSK, MPSK	$P_{eb} = G\left(\sqrt{2w \cdot \log_2 M} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)\right)$
M-QAM	$P_{eb} \approx \frac{4}{\log_2 M} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \cdot G\left[\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1}} \cdot w\right]$

- Bit errors rates para las diferentes modulaciones y umbrales:

Modulation scheme	$W = 10 \log e_b/n_0$	
	$P_{eb} = 10^{-3}$	$P_{eb} = 10^{-4}$
2 PSK	6.8	10.5
4 PSK	6.8	10.5
8 PSK	10.0	13.8
4 DPSK	9.1	12.8
16 QAM	10.5	14.4
64 QAM	14.7	18.8
256 QAM	19.3	23.5

- Bit error rate dependiendo de $w = 10 \log e_b/n_0$ (gráfica que más usaremos):



Con el valor obtenido de w en dB, vamos a la fórmula de la $(C/n)_{eq}$ y se puede obtener el bitrate.

- En ambientes reales, no sólo se da el ruido, sino también perturbaciones adicionales añadidas a las constelaciones x_k e y_k recuperadas en el proceso de demodulación.
- Estas deficiencias pueden ser causadas por:
 - Interferencia entre símbolos (ISI) dentro del canal I o Q, causada por un filtrado imperfecto o debida a la distorsión generada por los mecanismos de propagación multi-trayecto.

- Interferencia mutua entre los canales I y Q, debida a una función de transferencia asimétrica del canal de radiofrecuencia y que se debilita de manera selectiva.
- Interferencia de radiofrecuencia, con un canal adyacente o que coopera en esa misma frecuencia.
- Sistemas no lineales.