

Tema 4

Radioenlaces fijos

Contenido

1.	Introducción	2
2.	Estructura	2
2.1.	Vanos.....	2
2.2.	Estaciones intermedias	3
Estación nodal	3	
Repetidor intermedio activo.....	4	
Estación intermedia pasiva	5	
Estación intermedia pasiva. Resumen	5	
Tipos de estaciones intermedias pasivas	5	
2.3.	Secciones de conmutación	8
3.	Radiocanal	9
3.1.	Definición	9
Disposición a 4 frecuencias	9	
Plan a 2 frecuencias, 2 frecuencias por radiocanal	10	
3.2.	Plan de disposición de frecuencias	11
• Transmisión alternancia de polarización.....	12	
• Transmisión simultánea con 2 polarizaciones.....	12	
• Transmisión simultánea con offset	13	
4.	Umbral.....	14
Calculo del umbral.....	14	
5.	Calidad.....	18
5.1.	Trayecto ficticio digital de referencia.....	21
6.	Planficación	24

Tema 4 Radioenlaces fijos

1. Introducción

¿Por qué usar radioenlaces fijos?

- El medio es gratuito, por el contrario de otros medios de transmisión como la fibra óptica. Tan solo hay que pagar por el uso de determinadas frecuencias ya que el espectro radioeléctrico está saturado.
- El mantenimiento es más barato que las redes cableadas. Ya que para los radioenlaces fijos existe la posibilidad de determinar el punto en el que se ha producido el fallo.

En mayor o menor medida todos los servicios constan de radioenlaces fijos, por lo que es básico estudiar este tipo de enlaces.

Radio enlaces fijos



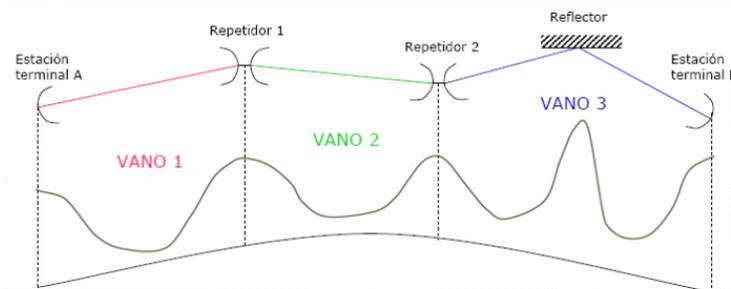
Radioenlaces de microondas

- Ruido cósmico ($T_a=T_0$).
 - Propagación por onda directa.
 - Línea de vista (LOS "Line of sight").
 - No hay variabilidad espacial.
 - No hay multitrayecto.
 - Variabilidad temporal lenta → Gaussiana.
- Causas
 - Factor k
 - Modelo de dos rayos
 - Lluvia

2. Estructura

2.1. Vanos

En una primera aproximación definiremos **vano** como parte del radioenlace con LOS.



La distancia máxima de vano queda definida como:

$$d_{max} = d_{Hor}(h_1) + d_{hor}(h_2)$$

Donde:

$d_{max} \equiv$ Distancia máxima del vano

$d_{Hor}(h_1) \equiv$ Distancia del horizonte radioeléctrico debido a la antena "receptora" de altura h_1

$d_{hor}(h_2) \equiv$ Distancia del horizonte radioeléctrico debido a la antena "receptora" de altura h_2

Con la definición de vano, aparece el concepto de estaciones intermedias, que serán usadas para dividir el radioenlace en sucesivos vanos para establecer una comunicación entre dos estaciones terminales.

El vano es el elemento básico para el diseño del radioenlace, para su diseño tendremos que tener en cuenta que:

- Si, por un lado, aumentamos el número de vanos, aumentará el número de estaciones, por lo tanto el coste será mayor.
- Sin embargo, si aumentamos la longitud del vano, para que éste sea viable, la potencia debe ser mayor y por lo tanto el coste también.

No existe una solución definida, sino que dependerá de las condiciones del problema y normalmente acarreará una solución de compromiso.

Se puede intuir que el radioenlace es secuencial por lo tanto, si perdemos la señal en un vano no existirá comunicación.

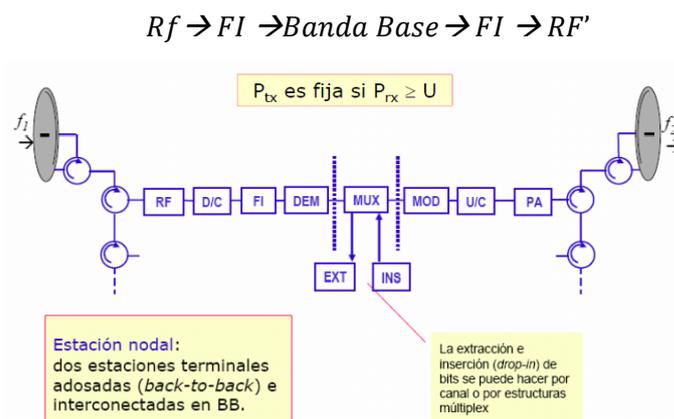
¿Qué pasa si perdemos la señal en un vano?

$$\text{Si } \boxed{P_{RX} \leq U \rightarrow F > MD} \text{ No recibimos nada.}$$

Las estaciones intermedias tienen un umbral para poder reenviar la señal. Si la potencia recibida está por encima de un umbral siempre se transmite con la misma *PIRE*.

2.2. Estaciones intermedias

Estación nodal



Este tipo de estación intermedia, es el único tipo que puede acceder a la información y, en su caso, manipularla. En la estación nodal la señal de entrada es captada con frecuencia RF , que se baja hasta una frecuencia intermedia FI y después se demodula para llegar a banda base.

En este punto, y dependiendo de las características de la señal, se demultiplexa y se hace el *Drop in* (este término se refiere a la inserción de canales, ya que podemos acceder a la información). Para la transmisión, se realiza el proceso inverso en lo referente a los pasos de frecuencias. En la transmisión, opcionalmente, puede existir un amplificador en banda base y siempre existirá un amplificador en FI , después del demodulador.

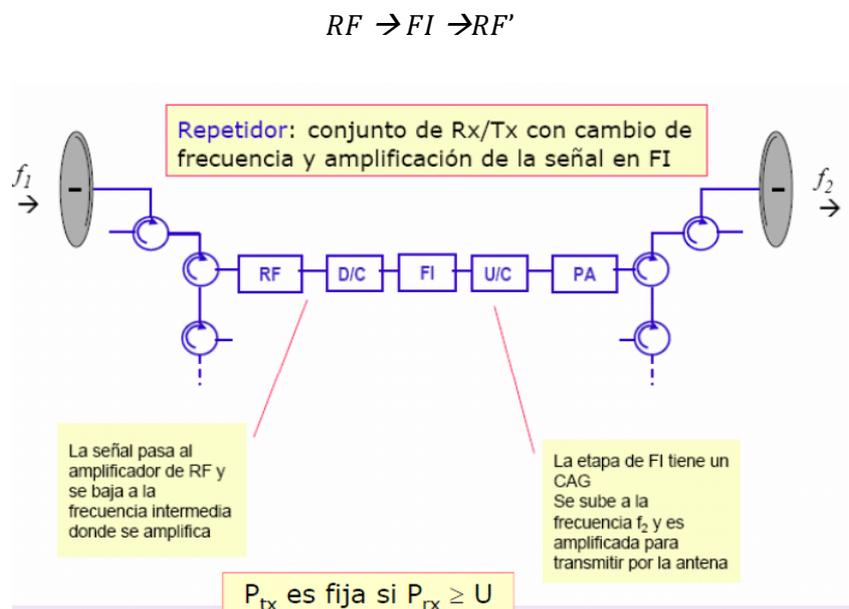
Dicho amplificador FI , siempre tiene entre sus características principales el CAG (Control automático de ganancia) para poder así mantener fija la potencia de salida de este tipo de estaciones intermedias. Con esto se puede afirmar que: *'Siempre y cuando la potencia de entrada supera un umbral, se producirá una transmisión con potencia de salida será fija.'*

Este tipo de estaciones deben tener al menos 2 transceptores, ya que se produce una recepción y posterior transmisión en cada sentido, por el contrario que las estaciones terminales que sólo tienen 1 transceptor.

Resumen de la estación nodal:

- Llega a banda base (*Drop in*: acceso a la información.)
- FI (CAG) \rightarrow PIRE fija sí y solo sí $P_{RX} > U$.
- Siempre $RF_{in} \neq RF_{out}$.
- Son necesarios 2 transceptores por radiocanal bidireccional

Repetidor intermedio activo.



Al contrario que las estaciones intermedias nodales, en este caso no se produce un acceso a la información. La señal no se llega a demodular, por lo que no se accede a la banda base, sino que se queda en FI para realizar una transmisión más sencilla y amplificar la señal.

Al igual que ocurría en la estación nodal, la potencia de transmisión P_{TX} es fija si la potencia de recepción P_{RX} es mayor que un umbral U .

Este tipo de estación intermedia, está compuesta por tan solo un transceptor. ¿Por qué? A pesar de que hay doble transmisión y recepción para un radiocanal bidireccional, al no llegar a pasar la información a banda base, estos transceptores no son completos. Así que se considera que tiene medio dos medios transceptores de recepción y otros dos medios transceptores de transmisión.

Resumen del Repetidor activo

- Llega hasta FI (No tiene acceso a la información)
- Amplificador FI con CAG – Pire fija si la $P_{RX} > U$.
- $RF_{IN} \neq RF_{OUT}$.
- Se usa un transceptor por radiocanal bidireccional.

Estación intermedia pasiva

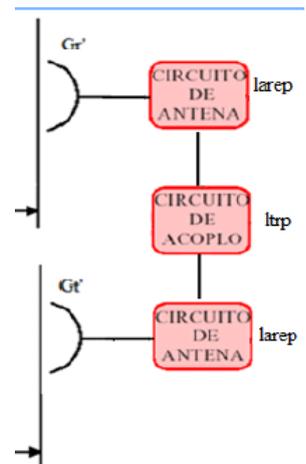
$$RF \rightarrow RF$$

Se considera en esencia un espejo radioeléctrico. No hay ningún elemento activo que amplifique la señal, por lo que no es necesario que la señal pase a FI y no son necesarios transceptores.

Es importante recalcar que es un elemento pasivo, y por lo tanto **no introduce ganancia**. La ganancia de la antena no es una ganancia activa, si no respecto a la antena isótropa, es decir, una ganancia directiva, debida a cómo concentra la señal transmitida o en qué dirección recibe la señal entrante.

Estación intermedia pasiva. Resumen

- No contiene elementos activos. ($P_{RXout} \propto P_{RXin}$)
- $RF_{in} = RF_{out}$.
- No hay transceptores por radiocanal bidireccional

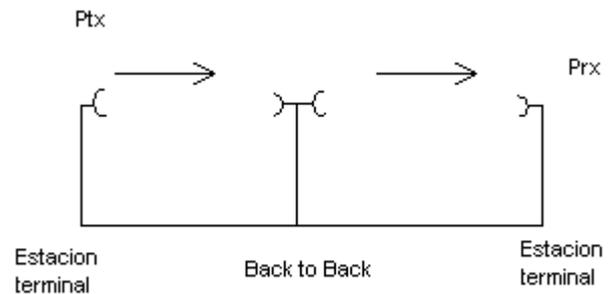


Tipos de estaciones intermedias pasivas:

- Back to back
- Reflectores

Back to Back

Formado por dos antenas, colocadas como en la imagen adjunta.



La señal recibida P_{RX} , queda definida con el siguiente balance de potencias:

$$P_{RX} = PIRE - L_{B1} + G_1 - L_{trp} + G_2 - L_{B2} + G_{Rx}$$

Donde:

PIRE: Es la potencia isotópica radiada equivalente, de la antena transmisora.

L_{B1} : Pérdidas básicas entre la antena transmisora y la primera antena del *back to back*.

G_1 : Ganancia de la primera antena del *back to back*

L_{trp} : Pérdidas de alimentación de la antena

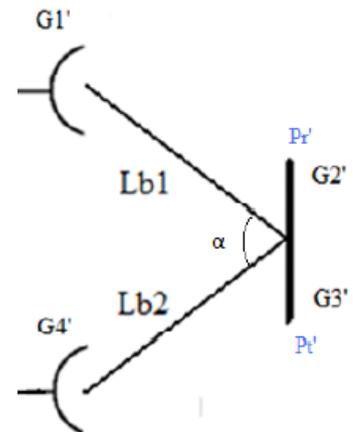
G_2 : Ganancia de la segunda antena del *back to back*.

L_{B2} : Pérdidas básicas entre la segunda antena del *back to back* y la antena receptora.

G_{Rx} : Ganancia de la antena receptora

Reflectores

Consiste en una sola antena que refleje la señal recibida tal y como indica en la figura adjunta. En un primer vistazo puede parecer distinto a la configuración "back to back", pero en esencia es lo mismo. El primer rayo incide en el reflector pasivo que lo capta con una superficie efectiva que conlleva una determinada ganancia. Esta señal es reflejada, radiada de nuevo en función de una ganancia que depende de la superficie efectiva de la antena. Debido a la imperfección de los materiales, no toda la señal captada es reflejada, lo que produce unas pérdidas por rendimiento, equivalente a las pérdidas por el cable de conexión en la configuración "Back to back"



La superficie efectiva de esta antena depende del ángulo de incidencia α , de la siguiente manera:

$$S_{ef} = S_{geo} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

En esta configuración de antenas intermedias pasivas, pasa exactamente igual que en la configuración "back to back". Las pérdidas que introduce el cable de alimentación de las antenas en la anterior configuración, en el caso del reflector lo introduce el hecho de que la superficie reflectora de la antena tiene un cierto rendimiento η .

Las estaciones intermedias pasivas sólo se usan cuando sean estrictamente necesarias, como en el caso de cambios de dirección en tramos ferroviarios. Esto es debido a que las pérdidas sin repetidor pasivo serían:

$$l_b \propto (d_1 + d_2)^2$$

Sin embargo, con un repetidor pasivo las pérdidas serían:

$$l_b \propto (d_1 \cdot d_2)^2$$

Lo cual hace que las pérdidas sin una estación pasiva sean por lo general mucho menores, y este tipo de estaciones sean de utilidad para casos excepcionales, como por ejemplo evitar un obstáculo en un radioenlace.

En este momento podemos introducir una nueva definición de vano.

Def. Vano: Parte del radioenlace donde existe LOS entre estaciones intermedias **activas**.

2.3. Secciones de conmutación

Def. Radiocanal: Elementos necesarios para que exista comunicación entre estaciones terminales, también incluye las frecuencias utilizadas.

Para un radiocanal bidireccional los diferentes tipos de estaciones tienen un número determinado de transceptores, tal y como hemos mencionado en su descripción. De forma que, si en un radioenlace se quiere aumentar el número de radiocanales, se tiene que aumentar como corresponda para cada caso, el número de transceptores.

Es común establecer un número N de transceptores de reserva en previsión de posibles incidencias en los equipos. De forma general se expresará $M + N$, lo cual significa que por cada M radiocanales principales se establecen N canales de reserva.

En estos casos existen *dos estrategias*:

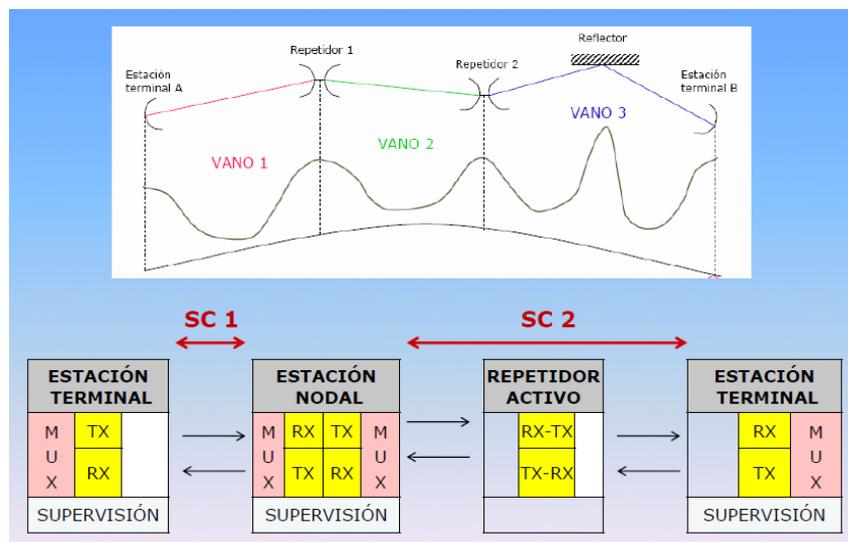
- Reutilizar frecuencias.
- Reservar frecuencias por si fallan.

¿Qué mecanismos hay para saber si una estación falla? ¿Cómo se puede saber?

Mediante *señales de telecontrol teledirigida y teleasistencia*, o también llamados *elementos de supervisión*. Estas señales son transmitidas en un radiocanal adicional, y sirven para controlar que el sistema funciona, detectar un error y, en su caso, encontrar en qué estación se ha producido. Siempre que haya que hacer un diseño de un radioenlace hay que incluir el radioenlace de supervisión.

Las únicas estaciones que pueden tener elementos de supervisión son las que pueden acceder a la información, esto es, estaciones intermedias nodales y estaciones terminales.

Def. Secciones de conmutación: son las partes del radioenlace entre dos estaciones con elementos de supervisión.



3. Radiocanal

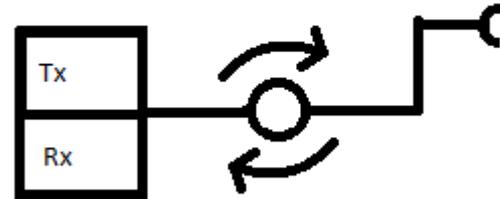
3.1. Definición

Def. Radiocanal: Conjunto de equipos transceptores y frecuencias necesarios para el intercambio de información entre dos estaciones terminales.

Plan a 2 frecuencias : Sólo utiliza 2 frecuencias por radiocanal independientemente del número de radiocanales.

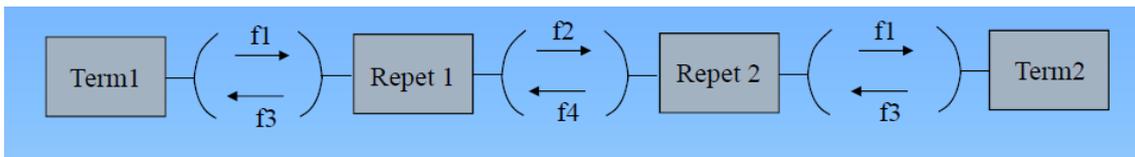
¿Cuántas frecuencias se utilizan en un radiocanal?

Normal general: Se procurará que la frecuencia de transmisión esté muy separada de la frecuencia de recepción, ya que la $Señal Tx \gg \gg Señal Rx$, y podría enmascararla.

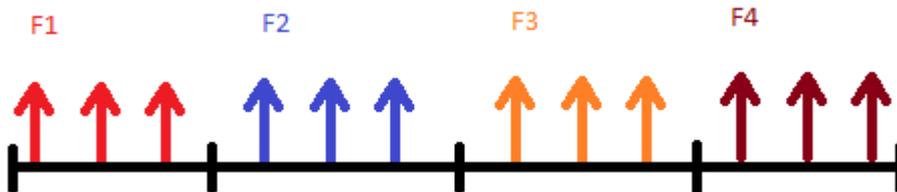


f1
.
.
.
.
.
.
.
.
f2

Disposición a 4 frecuencias



Dividimos el espectro en el número de frecuencias a utilizar en nuestro radiocanal:



Maximizamos la distancia entre portadoras del mismo vano, para evitar en la medida de lo posible que la señal transmitida no enmascare a la recibida, ya que $P_{tx} \gg P_{rx}$.

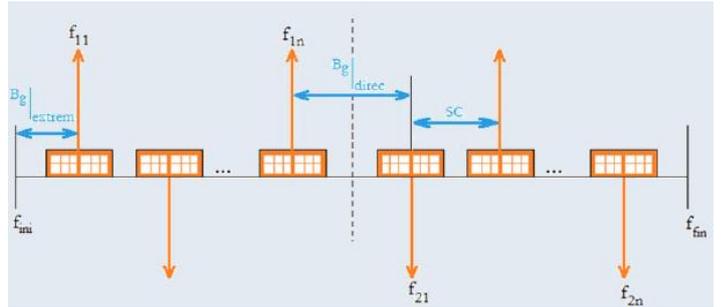
Se reduce considerablemente la utilización del espectro, pero aumenta la protección contra las interferencias intrasistema.

Debemos llegar a un compromiso entre el número de usuarios y las prestaciones que podemos ofrecer a los mismos.

$$\frac{B_T}{4 \cdot B_{señal}}$$

Plan a 2 frecuencias, 2 frecuencias por radiocanal.

Disposición de portadoras: En qué portadoras estoy emitiendo y en cuáles estoy transmitiendo.

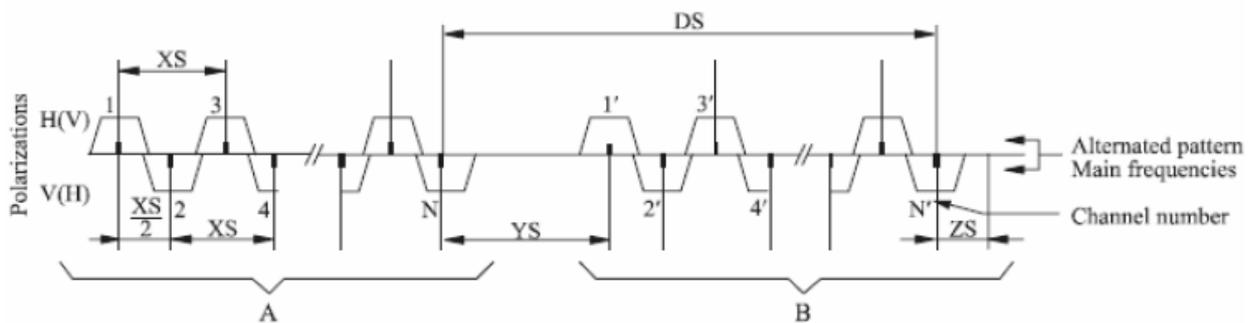


$Y_s \equiv$ Separación entre direcciones.

$Z_s \equiv$ Separación entre extremos.

$D_s \equiv$ Separación entre las portadoras de un mismo radiocanal.

$X_s \equiv$ Separación entre portadoras con la misma polarización.

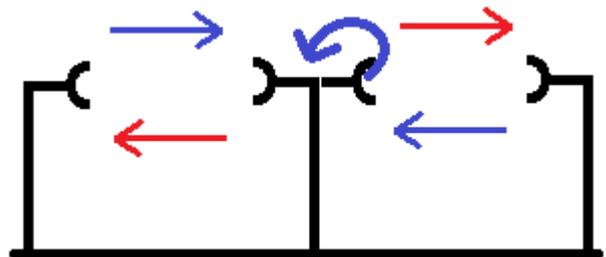


$S_c \geq B_{señal}$, pero para aprovechar el espectro aproximamos: $S_c \cong B_{señal}$

De esta forma se maximiza el número de portadoras y, por lo tanto, la eficiencia espectral, pero aumenta la interferencia por canal adyacente.

¿Qué sucede si reutilizamos las frecuencias?

Empeoramos las interferencias cocanales intrasistema. En el caso bidireccional a 2 frecuencias del apartado anterior, se reutilizan frecuencias y se puede dar el caso de que se produzca este tipo de interferencias, principalmente debidas al lóbulo posterior de la antena.



¿Cómo se puede solucionar o paliar estas interferencias cocanales intrasistema?

Poniendo antenas en zig-zag o antenas muy directivas. Es por esta razón por la que siempre vamos a diseñar planes a 2 frecuencias.



3.2. Plan de disposición de frecuencias

Los planes de disposición de frecuencias son solo para servicios fijos. En la UIT-R se contempla planes a 2 frecuencias en los que $S_c \cong B_{señal}$.

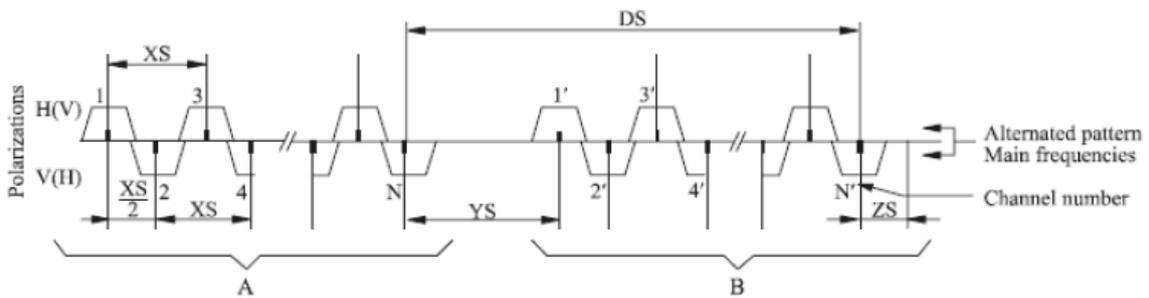
En la imagen adjunta se contempla un ejemplo de distribución de frecuencias de UIT-R, para distintas bandas con distintos tipos de recomendaciones de la serie F, para compatibilidad internacional. Cada país tiene una distribución propia de frecuencias, en cada anexo de esta recomendación se refleja estas distribuciones.

Band (GHz)	Frequency range (GHz)	Recommendations ITU-R F Series	Channel separation (MHz)
18	17.7-19.7	595	220; 110; 55; 27.5
	17.7-19.7	595, Annex 1	60 (block)
	17.7-19.7	595, Annex 2	50; 40; 30; 20; 10; 5; 2.5
	17.7-19.7	595, Annex 3	7; 3.5
	17.7-19.7	595, Annex 4	27.5; 13.75; 7.5; 5; 2.5; 1.25
	17.7-19.7	595, Annex 5	7; 3.5; 1.75
	17.7-19.7	595, Annex 6	55; 110
	17.7-19.7	595, Annex 7	55; 27.5; 13.75
23	18.58-19.16	595, Annex 7	60
	21.2-23.6	637	3.5; 2.5 (patterns)
	21.2-23.6	637, Annex 1	112 to 3.5
	21.2-23.6	637, Annex 2	28; 3.5
	21.2-23.6	637, Annex 3	112 to 3.5
	21.2-23.6	637, Annex 4	50
	21.2-23.6	637, Annex 5	112 to 3.5
27	22.0-23.6	637, Annex 1	112 to 3.5
	24.25-25.25	748	3.5; 2.5 (patterns)
	24.25-25.25	748, Annex 3	40 ⁽¹⁾
	25.25-27.5	748	3.5; 2.5 (patterns)
	25.27-26.98	748, Annex 3	60 ⁽¹⁾
	24.5-26.5	748, Annex 1	112 to 3.5
	27.5-29.5	748	3.5; 2.5 (patterns)
31	27.5-29.5	748, Annex 2	112 to 3.5
	31.0-31.3	746, Annex 6	25; 50
	31.0-31.3	746, Annex 7	28; 14; 7; 3.5

Los cálculos para la viabilidad del enlace se deben realizar con el número de banda otorgado (en estos casos 18, 23, 27 ó 31). Incluso aunque esta frecuencia no sea el punto medio del rango de frecuencias propuesto o no tengamos portadora justamente en esa frecuencia.

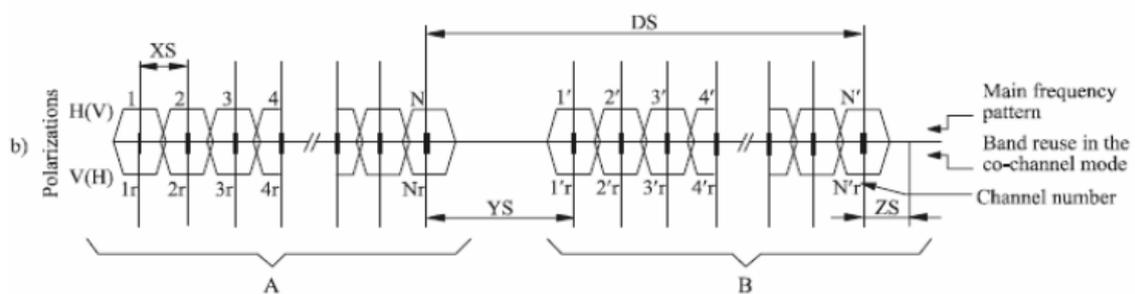
Para aprovechar al máximo el espectro se pueden alternar las polarizaciones. De esta forma, se aumenta el número de radiocanales y, por lo tanto, el número de usuarios finales.

- Transmisión alternancia de polarización:



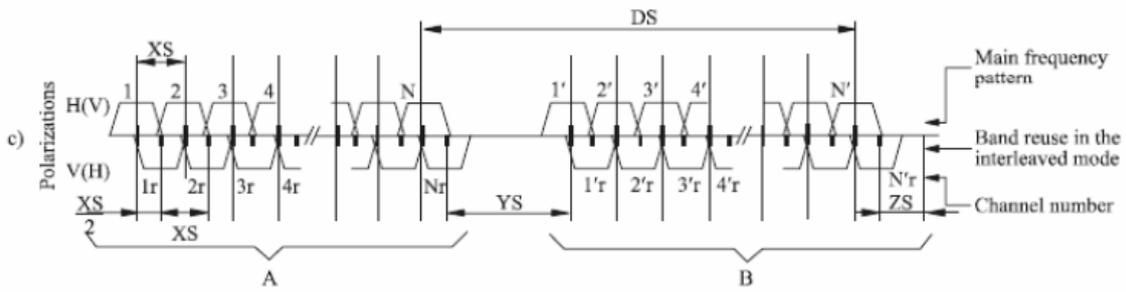
La separación entre portadoras de la misma polarización (X_S) es aproximadamente el doble del ancho de banda de la señal ($X_S \approx 2 \cdot B_{señal}$). Mediante dicha transmisión, el radiocanal se hace muy robusto ante interferencias de canal adyacente, y se consigue mandar el mismo número de señales.

- Transmisión simultánea con 2 polarizaciones:



Se manda el doble de señales, por lo que duplicar el número de usuarios, pero el sistema es más sensible a las interferencias canal adyacente e interferencias cocanal-copolar. Si tuviésemos antenas con elevada XPD , podríamos evitar las interferencias cocanales, siendo más viable este tipo de transmisión.

- Transmisión simultánea con offset:

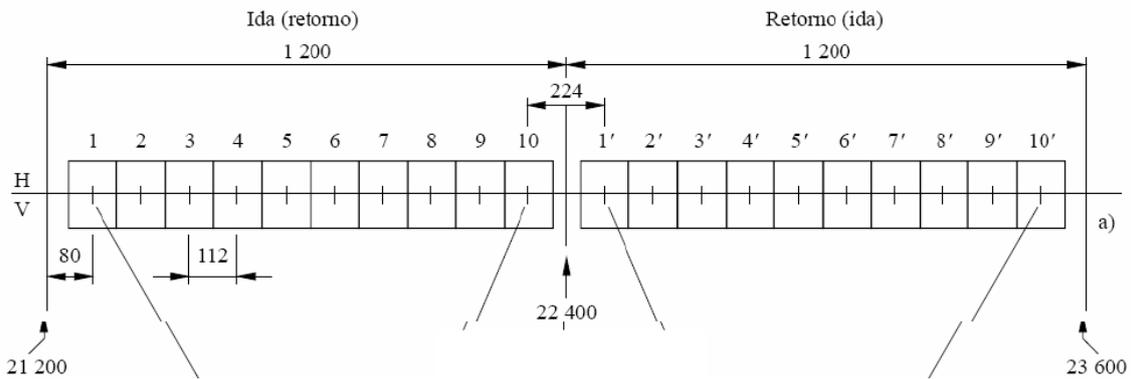


Al introducir cierta separación entre portadoras continuas de diferente polarización, se hace más robusto ante las interferencias cocanales-copolares-intrasistema.

Ejemplo

Banda de los 23 GHz. Distribución en Reino unido.

Nota: Si la banda entre extremos no es simétrica, la frecuencia central no tiene por qué ser el punto medio del espectro asignado.



$$B_{\text{asignado}} = 2360 - 21200$$

$$B_{\text{útil}} = B_{\text{asignado}} - ZS_1 - ZS_2 - Ys = 23600 - 21200 - 80 - 80 - 224$$

$$B_{\text{direccion}} = \frac{23600 - 21200 - 80 - 80 - 224}{2}$$

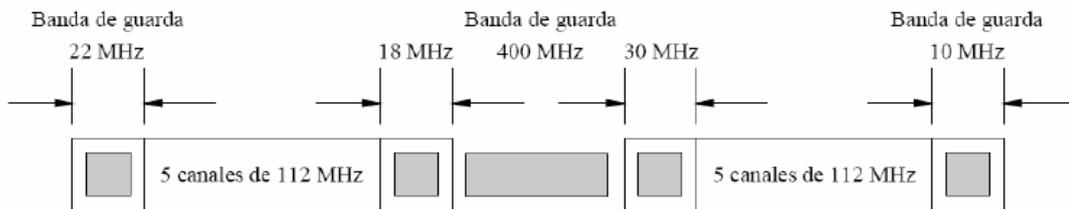
$$n^{\circ}_{\text{radiocanales}} = \frac{B_{\text{direccion}}}{Zc} + 1 = \frac{23600 - 21200 - 80 - 80 - 224}{2 \cdot 112} + 1 = 9 + 1$$

Donde:

$$\frac{B_{\text{direccion}}}{Zc} \equiv \text{número de huecos.}$$

En España tenemos:

a) Canales de 112 MHz (7 MHz × 16)



En este caso los canales en diferentes sentidos están en rangos de frecuencias distintos y separados. De forma que, en un sentido se encuentra entre 22 y 22.6 GHz y en el otro entre 23 y 23.6 GHz. La separación entre direcciones Y_s , es muy elevada en comparación al modelo Británico.

$$Y_s = 18 + 400 + 30 = 448 \text{ MHz}$$

Esto es tan solo un ejemplo de la diferencia de los cuadros de asignación de frecuencias entre distintos países para los servicios de radiocomunicación dúplex fijos, siendo necesarias las recomendaciones UIT-R para la compatibilidad internacional.

4. Umbral

Debido al uso de modulaciones digitales, es preciso que llegue un umbral mínimo para poder decodificar la señal.

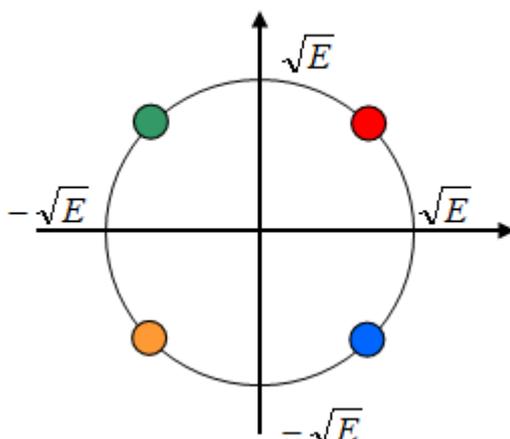
Los bits se basan en niveles discretos (1 y 0), pero en modulaciones digitales la información va en símbolos, que es lo que se transmite y posteriormente se interpreta.

Calculo del umbral

Vamos a estudiar principalmente dos, MPSK y MQAM:

M (Número de niveles):

- PSK → Símbolos en fases
- QAM → Símbolos en fase y amplitud

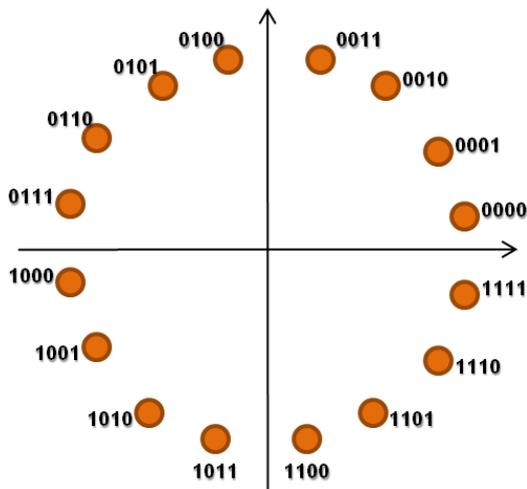


$$4PSK = 4QAM$$

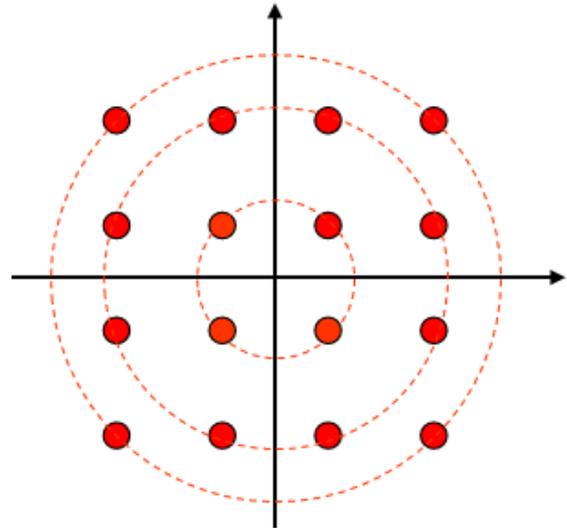
Como tienen que ser potencias de 2, tenemos que:

$$\log_2 4 = 2 \text{ Bits/símbol}$$

16 QPSK



16 QAM



La probabilidad de error de bit \rightarrow BER, está relacionada con la C/N

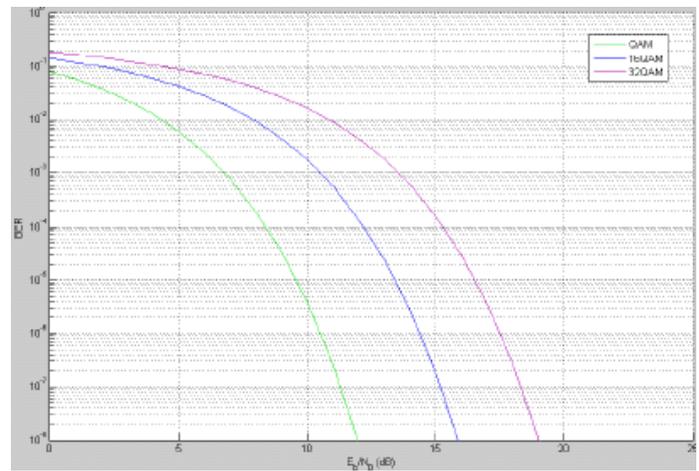
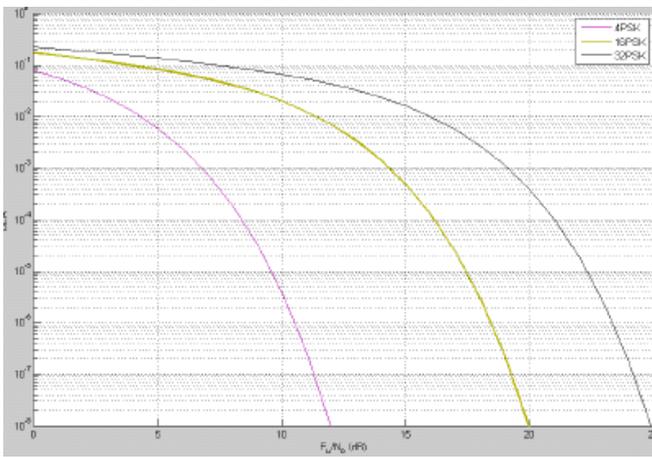
Si $\frac{e_b}{n_0} = w$ $\uparrow \uparrow$ entonces la BER $\downarrow \downarrow$

La BER máxima, con la que se puede decir que se puede extraer la información, está relacionada con una $\frac{e_b}{n_0}$ mínima.

Gráficamente, el ruido en este tipo de modulaciones se presenta abriéndose el ojo en la representación de los puntos en las constelaciones. Cuanto más ruido haya, más se diferenciará el símbolo del esperado, por lo tanto si la constelación es muy densa o el ruido muy grande, más posibilidades hay de que un símbolo se acerque a la región de decisión de otro símbolo, y por lo tanto se interprete de forma errónea. Nunca llegara el punto exacto del símbolo, pero sí uno aproximado, que se pueda interpretar como el símbolo correcto

BER (Bit Error Rate) nos da una idea del número de bits erróneos recibidos (normalmente se usa una codificación Gray). Un sistema, como hemos mencionado anteriormente, tiene una tasa de bits erróneos máxima para poder decodificar e interpretar la señal. Si la BER es la máxima permitida para que funcione, la relación señal ruido se corresponde con la mínima que tiene que llegar al sistema para que se pueda interpretar la señal, y está relacionada con la potencia umbral.

Una vez vista la relación entre la *BER* y la relación *señal a ruido*, se puede asociar a la potencia o campo umbral que tiene que llegar a nuestro sistema. De forma que si existe una tasa de error máxima permitida, por encima de la cual nuestro sistema no funciona, implica que el umbral aumente, y nuestro margen de desvanecimiento sea menor.



Además, en estas gráficas se aprecia que para distintas modulaciones, los requisitos de la tasa de error de bit (BER) son distintos conforme aumentamos el número de bits por símbolo de la modulación. Ya que al incrementar el número de niveles (M), las regiones de decisión son más estrechas (existen más símbolos en la constelación y mayor probabilidad de que interfieran entre ellos) siendo el error mayor.

Degradación del umbral → Aumento del umbral para satisfacer las condiciones del BER . En las gráficas anteriores se puede apreciar este hecho.

Si queremos máxima calidad y mínimo umbral, la mejor modulación es $4 - PSK$. Pero teniendo en cuenta que:

$$B = K \cdot F \cdot \frac{V_b}{\log_2 M}$$

Donde:

K ≡ para nosotros será 1

F ≡ depende del filtro, alrededor de 1

V_b ≡ velocidad de símbolo [$bits/s$]

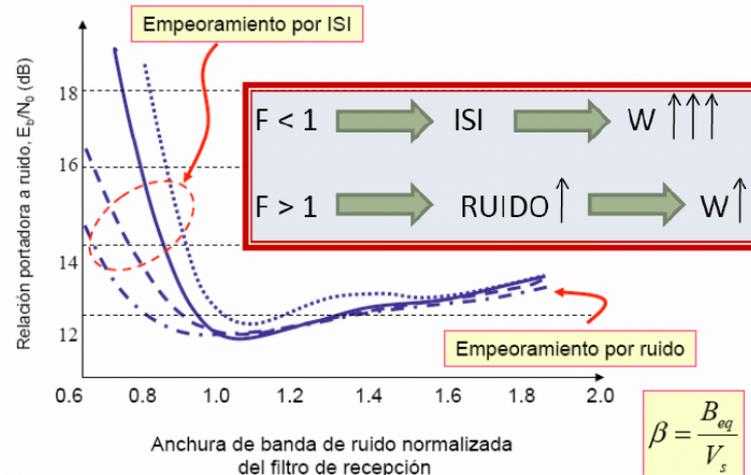
M ≡ número de bits por símbolo

Por lo tanto, el ancho de banda también es el mayor, al tener una M pequeña, esto implica una separación de portadoras mayor y un número de usuarios menor. Así que debemos buscar una solución de compromiso.

Degradación del umbral debida al filtro premodulador

$$W_{min} = f(\text{modulación ideal}) + \Delta_{filtro}(\text{pre y post modulador}) + \Delta_{interferencias}$$

Tal y como se puede apreciar en la gráfica adjunta, la F del filtro premodulador está relacionada con la forma del filtro usado (Para $F = 1$ filtro ideal, respuesta rectangular en frecuencia) influirá cuantiosamente el ruido de nuestra señal. Cuando $F < 1$ se produce interferencia entre símbolos (ISI), que es mucho más perjudicial para la señal a ruido requerida que el ruido. Por esta razón, normalmente se diseñan filtros con F alrededor de 1.2 o 1.4, para asegurarse de que no les afecte las interferencias entre símbolos.



Por lo tanto tenemos que :

$$BER^{max} \rightarrow W^{min} \rightarrow U$$

Modulación

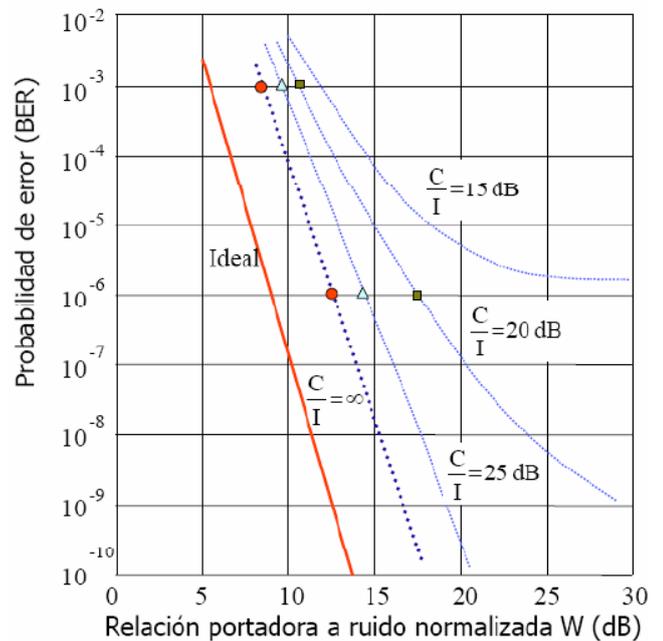
+

Filtro $\left\{ \begin{array}{l} F > 1 \rightarrow \text{incremento debido al ruido: Degradación del umbral} \\ F < 1 \rightarrow \text{No cumplimos el criterio de Nyquist y por lo tanto existe una falta de sincronismo y una interferencia entre símbolos ISI.} \end{array} \right.$

+

Interferencias

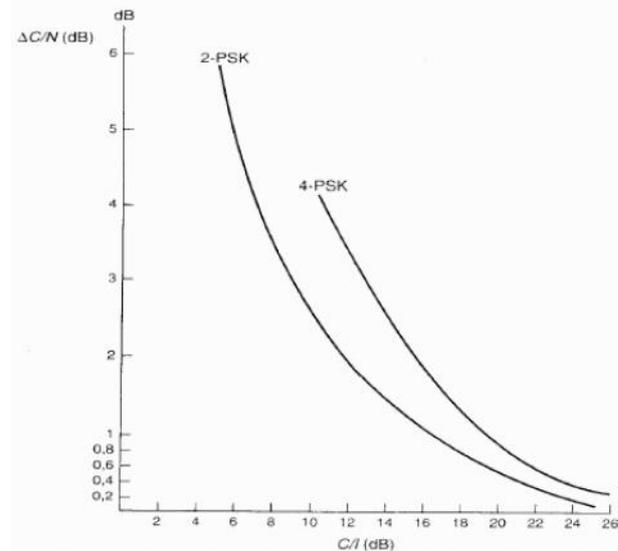
Además del efecto del filtro y el de la modulación, pueden aparecer interferencias que degradarán el umbral en función de la C/I . Si la potencia de señal es muy cercana a la potencia de las interferencias, es decir, si C/I es muy baja, para una misma relación portadora ruido, la BER , como se puede apreciar en las gráficas, aumenta.



Hay que mencionar que un incremento en la W , es equivalente a un incremento del umbral, por lo tanto si queremos disminuir la BER, tendremos que aumentar relación portadora ruido, y en consecuencia, aumentamos el umbral. (Degradamos el umbral.)

$$\Delta W = \Delta U$$

¿Qué diferencia existe entre la línea ideal de la gráfica y las demás? La relación portadora interferencia ideal, es el resultado de sumar el ruido y las interferencias como si fueran dos señales gaussianas, algo que no puede ser.



A modo de resumen tenemos que el umbral puede verse degradado debido a la elección de modulación, al efecto del filtro y a la interferencia.

Modulación: no recibimos "1" y "0", recibimos símbolos, que pueden estar codificados por ejemplo en la fase (PSK), en la frecuencia (FSK) o en fase y amplitud (QAM). Si disponemos de una BER máxima, cualquier aumento de esa tasa de errores hará que dejemos de poder recibir la señal. Si conseguimos agrupar mayor número de símbolos en un valor, la comunicación podrá ser más rápida $B = V_b \frac{1}{\log_2 M}$. Si aumentamos el número de niveles podremos mandar más información, esto significará los símbolos se situarán más próximos y por tanto se necesitará más potencia para que no se confundan los símbolos en recepción. Esto conllevará una **degradación del umbral**. Como en otros puntos de la radiocomunicación, debe existir una solución de compromiso.

Efecto del filtro: Siempre aparece, si no se dice nada se usará un valor de $F = 1$. Como se pudo ver en las gráficas, el filtro producía una **degradación del umbral** que era mayor en caso de que $F < 1$ por la interferencia entre símbolos.

Interferencias: No siempre estará ahí, y dependerá del nivel de C/I que tengamos, cuanto menor sea mayor **degradación del umbral** existirá.

5. Calidad

Una vez calculado el umbral, tenemos que pasar a evaluar la calidad del sistema de radioenlaces fijos. Como mencionamos anteriormente, estamos en el rango de las microondas, según recomienda la UIT para servicios fijos y tendremos que evaluar la calidad de fidelidad y disponibilidad.

El margen de desvanecimiento vendrá dado por la calidad de disponibilidad, que, a modo de recordatorio, eran aquellas interrupciones cuyo tiempo era mayor de 10 segundos. Sus causas eran:

- Factor K.
 - Reflexión por el suelo.
 - Lluvia.
- } Propagación

Además, al ser específicamente radioenlaces fijos aparece otra causa que hasta ahora no habíamos considerado.

- **Equipos.**

Es decir, si en un radioenlace (formado por equipos transceptores como vimos en apartados anteriores), se produce un fallo en uno de los equipos, tendremos una interrupción del funcionamiento de más de 10 segundos.

La indisponibilidad total será:

$$U_{total} = U_e + U_p$$

Donde:

$U_e \equiv$ Indisponibilidad debida a los equipos

$U_p \equiv$ Indisponibilidad debida a la propagación

La indisponibilidad de un solo equipo será de la forma:

$$U_e = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} \approx \frac{MTTR}{MTBF}$$

Donde:

MTTR : “Mean time to repair” Tiempo medio en reparar.

MTBF: “Mean time before fail” Tiempo medio hasta que falle.

El tiempo medio de vida de los elementos que vamos a usar suele ser muy alto, por eso se puede despreciar el MTTR respecto al MTBF.

En un radioenlace, para calcular la indisponibilidad de los equipos se tiene que:

$$U_{e\ total} = \sum U_{e\ equipos} \rightarrow \text{si son iguales} \rightarrow N \frac{MTTR}{MTBF}$$

En este punto cabe recordar el número de equipos que usan las distintas estaciones de un radioenlace.

Estación terminal: 1 transceptor

Estación nodal: 2 transceptores.

Repetidor activo: 1 transceptor. (2 medio transceptores por que no pasa a banda base)

R pasivo : ningún transceptor.

El cálculo de la indisponibilidad por propagación se realiza con los métodos explicados en otros temas. **Normalmente**, de las posibles causas, (factor k, reflexión en el suelo y lluvia) sólo tendremos en cuenta la última causa. $MD = F_{lluvia}^p$

¿En qué vano lo calculamos?

La indisponibilidad de un vano no se puede compensar con la de los otros, se elegirá el caso más restrictivo (suponiendo que en un vano llueve, mientras que en el resto no). En desvanecimientos de lluvia los vanos del radioenlace son independientes por esa razón:

$$U_{total} = \sum U_{p \text{ vanos}}$$

Una vez hayamos calculado la indisponibilidad por los equipos y por la propagación, la indisponibilidad total será la suma de ambas.

$$U_{total} = U_e + U_p$$

Fidelidad.

Como se ha explicado anteriormente la fidelidad cumple la ley de los 10 dB/década. Así que para nuestro caso será:

$$P_0 \cdot 10^{-\frac{MD}{10}}$$

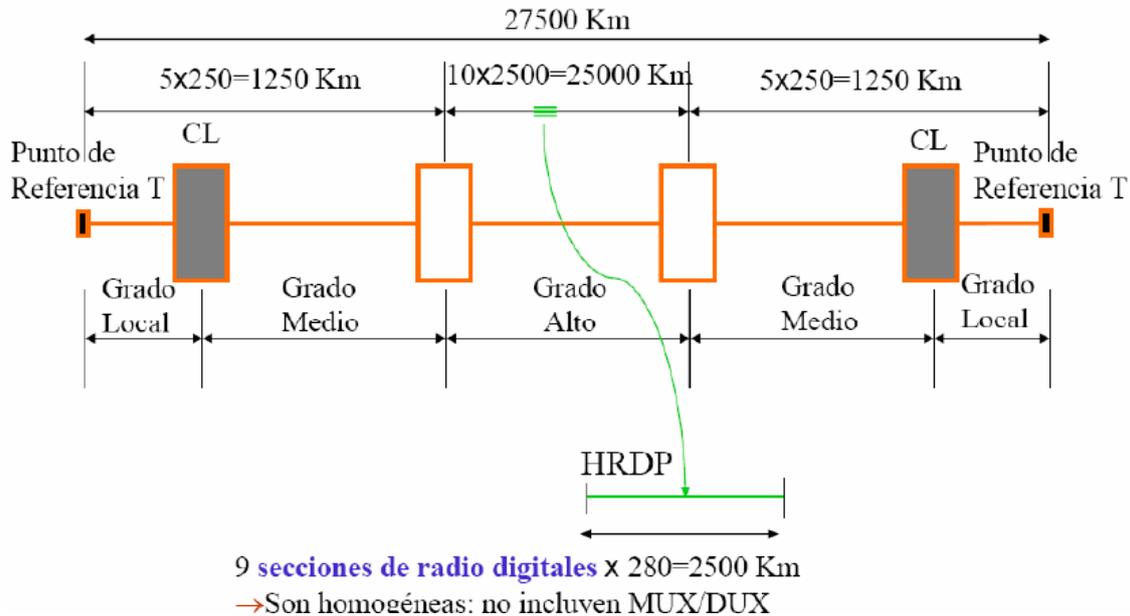
Como para el caso de la disponibilidad la infidelidad total será:

$$Infidelidad_{total} = \sum infidelidad_{vanos}$$

5.1. Trayecto ficticio digital de referencia

La UIT para establecer los parámetros de calidad de un radioenlace para que sea competente, se "inventa" un radioenlace con las siguientes características:

Rec ITU-T G.821: Para canales con tasas por debajo la primaria
 $N \times 64$, $N \leq 24$ (1.544 Mbit/s) ó $N \leq 31$ (2.048 Mbit/s)



Donde la longitud de los vanos entre 280 y 2500 km. ¿Por qué esa distancia mínima?

Pueden existir radioenlaces más pequeños, pero la indisponibilidad debida a la propagación, en distancias menores que ésta sería muy pequeña comparada con la indisponibilidad normal, considerada por la UIT, de los equipos que formen el radioenlace. Es decir, para distancias menores de 280 km estaríamos limitados por los equipos más que por la propagación, por lo tanto tiene más sentido hablar para enlaces de distancias mayores.

Objetivos de calidad de disponibilidad

↳ • U_{total}

- $U_{eTotal} = \sum_{n=1} U_{equipo} = \sum \frac{MTTR}{MTBF}$
 ¿Cómo mejorar esta indisponibilidad? - Invirtiendo más dinero en equipos.
- $U_{pTotal} = \sum_{n=1}^{n_{vanos}} U_p = U_{p1} + U_{p2} \dots + U_{p3}$
 Lo normal es repartir indisponibilidades de forma proporcional con la distancia, ya que cuanto más largo sea el vano más crítico es.

¿Cómo mejorar la calidad de la propagación?

En definitiva, tendremos algo similar a esto:

$$MD_1 = F_{lluvia}^{Up1} = P_{RxCN} - P_{RxCU}$$

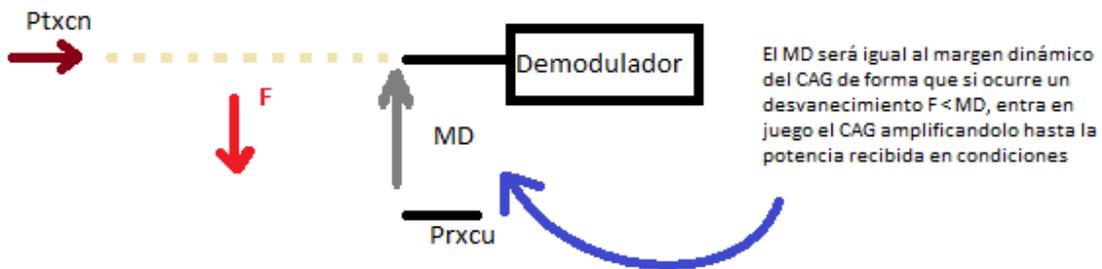
Las soluciones tienen que estar adaptadas al servicio que tengamos. Se estudian 3 posibles configuraciones de trabajo:

- CAG

La entrada del demodulador siempre será constante. El margen dinámico del CAG tiene que ser igual al margen de desvanecimiento. Con esto nos aseguramos que se entregará una potencia constante para cualquier desvanecimiento menor que el MD esperado.

En la práctica los amplificadores de ganancia variable (CAG), no tienen por qué ser igual al desvanecimiento calculado, así que normalmente se usa un poco más a lo esperado.

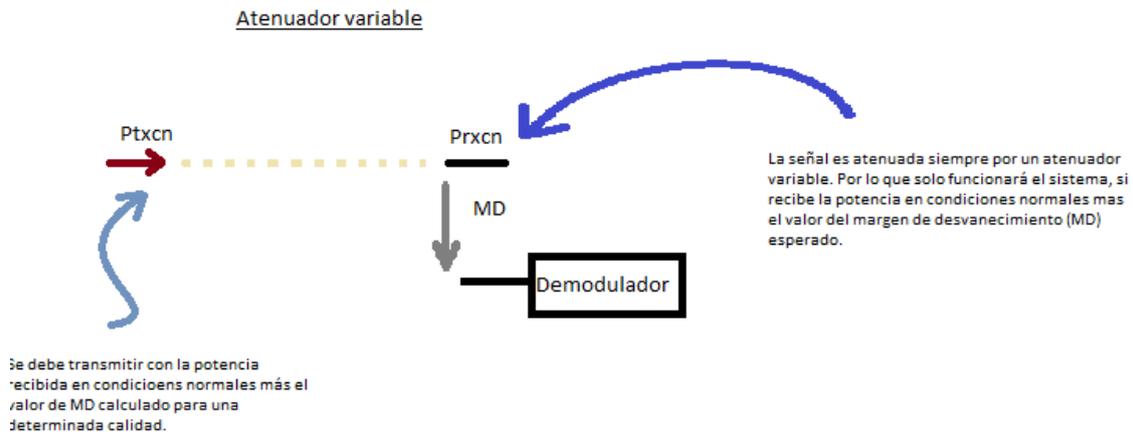
CAG (Control automático de ganancia)



- Atenuador variable :

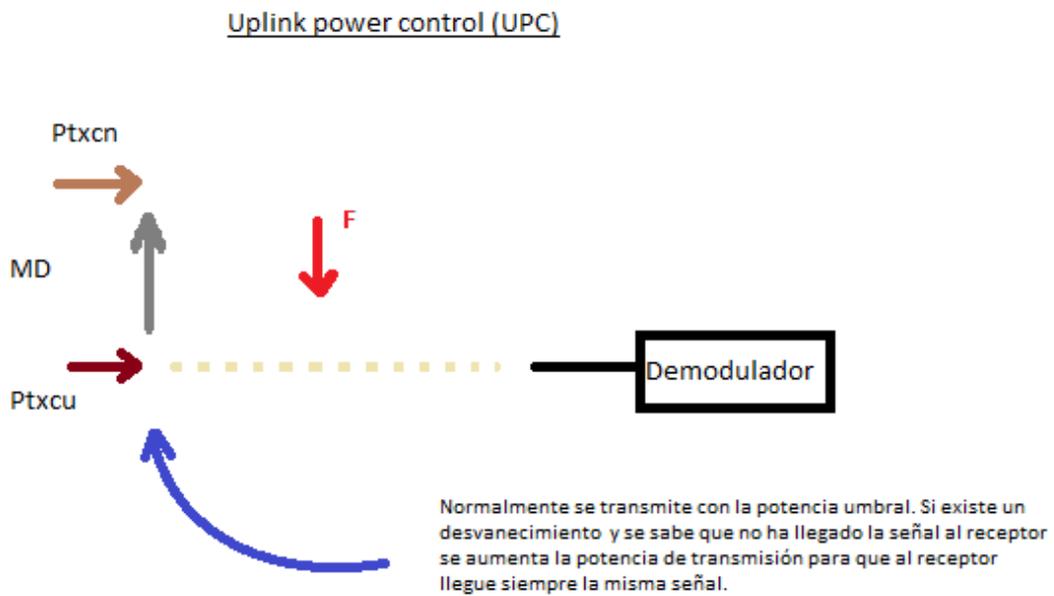
La potencia que llega a nuestro receptor tiene que estar por encima de las condiciones normales un máximo de $PRx_{CN} + MD$, y el atenuador siempre bajará esta potencia.

¿Por qué se usan este tipo de soluciones? Porque suelen ser más baratos los atenuadores variables que los amplificadores CAG.



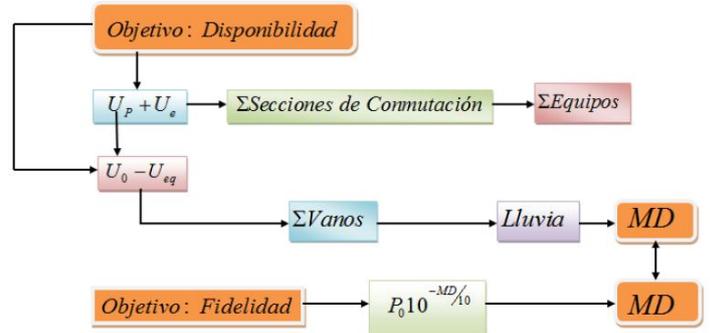
Uplink power control [UPC] :

En este caso el control se realiza en la estación transmisora, de manera que siempre transmitiremos con las condiciones umbrales y si aparece un desvanecimiento aumentamos la potencia transmitida.



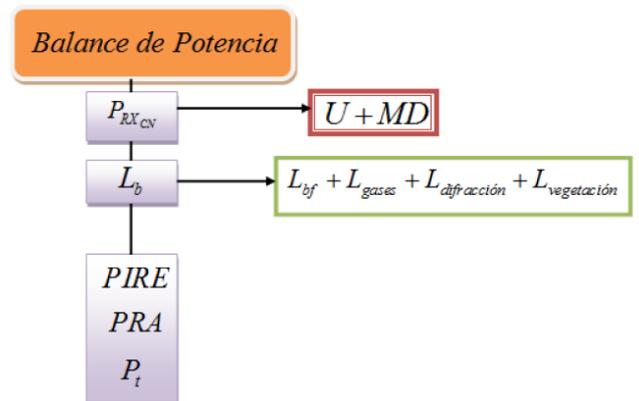
6. Planificación

En la imagen se detallan los pasos para diseñar un radioenlace. Primero se marcan unos objetivos de disponibilidad. Una vez calculado, esta disponibilidad nos dará un margen de desvanecimiento para que se cumpla. Con dicho MD, se puede calcular la calidad de fidelidad que depende, como se ha mencionado en temas anteriores, de la calidad de disponibilidad.



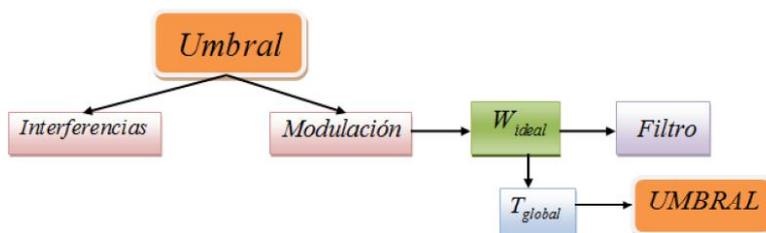
↑ P_{RxSD}

- Minimizar atenuación de campo
 - Factor K
 - Reflexión en el suelo
 - Difracción
- Potencia transmitida
- Antenas directivas
- ↓ L_{TX} → cables



↓ Umbral

- F sistema de Rx
- \exists interferencias
- Filtro → ideal $F=1$ → normalmente se usa entre 1.3 y 1.4
- Modulación → BPSK → La mejor modulación para la degradación del Umbral, no presencia eficiencia espectral.



- Como complemento al estudio de este tema se propone la realización de los ejercicios de la colección del Tema 4. En clase se realizaron el *ejercicio 9* principalmente dedicado a la degradación del umbral y sus causas (Interferencias, factor del filtro, ISI) y el *ejercicio 13* sobre el estudio conjunto de indisponibilidad de equipos y propagación para cumplir unos objetivos de calidad de disponibilidad especificados.