

#### **4.- TEORIA GENERAL SOBRE RADIOENLACES**

Se denomina, en general, radioenlace a cualquier interconexión entre terminales de telecomunicación efectuada por ondas radioeléctricas. Cuando los terminales son fijos, se habla de radioenlaces del Servicio Fijo.

Podemos definir los radioenlaces terrenales del servicio fijo como sistemas de radiocomunicaciones entre puntos fijos situados sobre la superficie terrestre, que proporcionan una capacidad de transmisión de información con unas características de disponibilidad y calidad determinadas. Generalmente, los sistemas de radioenlaces se explotan entre unos 2 GHz y 50 GHz, dependiendo de su capacidad.

Los radioenlaces establecen circuitos de telecomunicación de tipo dúplex, a 4 hilos equivalentes, por lo que deben transmitirse dos portadoras moduladas, una para cada sentido. Se denomina radiocanal a la pareja de portadoras de ida y de retorno. Según el tipo de modulación, pueden clasificarse los radioenlaces en analógicos y digitales.

Los radioenlaces del servicio fijo hacen uso de la propagación troposférica en condiciones de visibilidad directa. En consecuencia, para salvar las limitaciones de alcance impuestas por la redondez de la Tierra y los obstáculos geográficos del terreno, se requiere la utilización de estaciones repetidoras, de manera que un radioenlace está constituido por dos estaciones terminales y un conjunto de estaciones repetidoras intermedias, o simplemente, repetidores. Se denomina vano a la sección de enlace radioeléctrico entre un terminal y un repetidor o entre dos repetidores. Como el trayecto del rayo debe estar despejado al menos en el 60% de la primera zona de Fresnel para el obstáculo peor y en condiciones normales de refractividad atmosférica, la longitud de los vanos tiene un límite superior, que es del orden de los 80 km para frecuencias inferiores a unos 10 GHz. Por encima de esta frecuencia, la atenuación por lluvia suele ser el factor que limita la longitud de los vanos.

En general, en los radioenlaces se emplean antenas muy directivas, con buena relación delante-atrás, lo que permite establecer cada radiocanal empleando únicamente dos frecuencias, una para cada sentido de transmisión, las cuales se reutilizan en vanos sucesivos. Debido a esta fuerte reutilización de las frecuencias pueden producirse interferencia cocanal. Para reducir al mínimo los efectos de estas posibles interferencias, se cambia la polarización de la onda en cada vano.

Respecto a las bandas de frecuencias disponibles, en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) elaborado por la Secretaría General de Comunicaciones de la Administración española figuran las diversas bandas atribuidas a radioenlaces del servicio fijo. En las notas de utilización nacional se dan canalizaciones e informaciones complementarias.

##### **4.1 – PARÁMETROS BÁSICOS DE UN RADIOENLACE**

Son aquellos parámetros involucrados en la ecuación de Friis:

$$P_R(dBm) = P_T(dBm) - L_{TT}(dB) + G_T(dB) - L_b(dB) + G_R(dB) - L_{TR}(dB)$$

donde :

- $P_T(dBm)$  ? Potencia de transmisión, entregada por el amplificador del transmisor a los circuitos de acoplamiento a la antena.
- $L_{TT}(dB)$ ,  $L_{TR}(dB)$  ? Pérdidas en los circuitos de acoplamiento a la antena del transmisor y receptor, respectivamente.
- $G_T(dB)$ ,  $G_R(dB)$  ? Ganancias de las antenas de transmisión y recepción, respectivamente.
- $L_b(dB)$  ? Pérdida básica de propagación.
- $P_R(dBm)$  ? Potencia recibida, que se define a la entrada del amplificador de RF del receptor.

Se denomina diagrama de niveles o hipsograma a la curva que representa las variaciones de la intensidad de la señal a lo largo del trayecto de propagación. El hipsograma se obtiene de la ecuación de balance descrita anteriormente.

Como ya hemos explicado, los radioenlaces terrenales se diseñan de forma que en cada uno de sus vanos se den condiciones de visibilidad directa, habida cuenta de la curvatura de la Tierra. Esta condición debe cumplirse en condiciones normales del índice de refracción atmosférico. En casos de refractividad desfavorable, debe preverse el despejamiento necesario en función de la atenuación por difracción admisible para el valor del factor  $k$  de modificación del radio terrestre correspondiente. Estas previsiones corresponden a un determinado porcentaje de tiempo, es decir, son de tipo estadístico, dado el carácter aleatorio de la variación de la refractividad atmosférica. La consecución de un cierto despejamiento, implica la situación de las antenas a unas alturas determinadas, cuestión de gran importancia técnica y económica.

En efecto, aunque desde el punto de vista de la propagación es conveniente que las antenas estén altas sobre el suelo, ello encarece la instalación (el precio de las torres aumenta con la altura según una ley de variación mayor que la ley lineal) y también aumentan las pérdidas en el alimentador de antena.

En condiciones normales de propagación, con despejamiento adecuado, la pérdida básica de propagación es la del espacio libre. Sin embargo, existen atenuaciones adicionales que se manifiestan en condiciones de propagación anómalas, dando lugar a desvanecimientos. Para un vano de radioenlace terrenal, la pérdida básica de propagación incluye:

- $L_{bf}$  ? Pérdida en condiciones de espacio libre.
- $L_{di}$  ? Pérdida por difracción, debida a un despejamiento insuficiente.
- $L_d$  ? Pérdida por desvanecimiento, desenfoco y centelleo.
- $L_a$  ? Pérdida por errores en los ángulos de salida y llegada.
- $L_p$  ? Pérdida ocasionada por las precipitaciones.
- $L_g$  ? Pérdida debida a la absorción de gases y vapores atmosféricos.

## 4.2 – CALIDAD EN RADIOENLACES DIGITALES

### 4.2.1 – UMBRAL Y MARGEN BRUTO DE DESVANECIMIENTO

La calidad de un enlace es una función del porcentaje de tiempo que la señal recibida podría encontrarse por debajo del nivel umbral o threshold del receptor, relativo al período de tiempo total observado. Es por esto que hay que fijar una diferencia necesaria entre el nivel nominal de la señal y ese valor umbral conocida como margen de desvanecimiento o margen de fading.

El threshold se define en enlaces digitales como la mínima potencia de recepción requerida para que el demodulador trabaje a una específica tasa de error. Son dos umbrales los que se citan normalmente, BER de  $10^{-3}$  y BER de  $10^{-6}$ . Las probabilidades de error para los sistemas de modulación más utilizados en los radioenlaces digitales, en condiciones de recepción ideales con receptor óptimo, son función del parámetro normalizado  $w$ .

$$w = e_b / n_o = p_r / (kT_o f_r V_b)$$

Donde  $e_b$  se refiere a la energía por bit a la amplitud máxima de la portadora,  $n_o$  es la densidad de ruido,  $p_r$  es la potencia recibida,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $T_o = 290 \text{ }^\circ\text{K}$  la temperatura de referencia,  $f_r$  el factor del ruido del receptor y  $V_b$  la velocidad binaria.

Lo primero con lo que hay que contar es con el valor de  $w$  correspondiente a la probabilidad de error deseada según el tipo de modulación empleado y después igualando  $p_r = t_h$  comprobamos que el umbral de recepción es dependiente de:

$$T_h (\text{dBm}) = W (\text{dB}) + F_r (\text{dB}) + 10 \log V_b (\text{bit/s}) - 174$$

Se denomina margen bruto de desvanecimiento a la diferencia entre las potencias recibida y umbral. Designando al margen bruto como  $M_3$ , se tiene:

$$M_3 (\text{dB}) = C (\text{dBm}) - T_{h3} (\text{dBm})$$

Los fabricantes de equipos especifican los valores del umbral del receptor de sus equipos de radio, relacionándolos con el ancho de banda del sistema.

### 4.2.2 – CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DE INDISPONIBILIDAD Y CALIDAD

Uno de los objetivos de la planificación de radioenlaces digitales es obtener la longitud óptima de vano compatible con el cumplimiento de las cláusulas de UIT-R en cuanto a indisponibilidad y calidad. Es obvio que, cuanto mayor pueda ser dicha longitud, se requerirán menos equipos y emplazamientos para establecer una ruta dada, con la consiguiente ventaja económica.

Tras numerosas experiencias y mediciones, se ha llegado a la conclusión de que la propagación multitrajecto es el factor dominante en el desvanecimiento por debajo de

unos 10 GHz. Por encima de esta frecuencia, los efectos de las precipitaciones tienden a determinar cada vez más la longitud admisible del vano a través de los objetivos de interrupción del radioenlace (indisponibilidad). La disminución necesaria de la longitud del vano, al aumentar la frecuencia, reduce la severidad del desvanecimiento debido a la propagación por trayectos múltiples. Estas dos principales causas de desvanecimiento suelen ser mutuamente exclusivas, por tanto, deben sumarse los tiempos de interrupción respectivos previstos para ellas.

Como los eventos de errores que afectan a la indisponibilidad son relativamente largos (> 10 s) y el desvanecimiento multitrayecto es de breve duración (algunos ms), se realizan por separado las evaluaciones de indisponibilidad y de fidelidad (calidad de error). Para la primera únicamente se considera el efecto de la lluvia por encima de 10 GHz. Para la evolución de la calidad de fidelidad se toman en cuenta las interrupciones breves debidas al ruido térmico, interferencias y distorsiones provocadas por desvanecimiento selectivo. La evolución se realiza calculando porcentajes de tiempo para cada vano y obteniendo el porcentaje total que se compara con los objetivos.

Para facilitar el estudio de las degradaciones de la transmisión de señal para el caso de radioenlaces digitales deben establecerse modelos de conexiones que comprendan diferentes clases de elementos de transmisión, con una longitud determinada. Se define con este fin el llamado Trayecto Digital Ficticio de referencia (HRDP; *Hypothetical Referente Digital Path*) cuya longitud es 2.500 km. El HRDP para radioenlaces está dividido en 9 secciones de radio digitales de unos 280 km de longitud aproximadamente. Las secciones son homogéneas, en el sentido de que no incluyen multiplexación/demultiplexación de las señales.

#### 4.2.2.1 – EVALUACIÓN DE LA INDISPONIBILIDAD

Se entiende por disponibilidad de un equipo o sistema su aptitud para desempeñar la función para la que ha sido proyectado. Se cuantifica por la probabilidad de que el sistema se encuentre en condiciones de funcionamiento en un momento dado. Para que se considere una situación de indisponibilidad el sistema debe permanecer no operativo un tiempo mayor que un cierto valor de referencia  $T_o$ . En este caso se dice que el sistema está indisponible durante ese tiempo, que se computa como tiempo de indisponibilidad.

La indisponibilidad total es la suma de los intervalos de tiempo de indisponibilidad, dividida por el tiempo de observación. El tiempo T ha de ser suficientemente largo para obtener resultados estadísticamente significativos.

$$U = \frac{\sum T_{ind}}{T} \cdot 100(\%)$$

La indisponibilidad se describe en términos de interrupciones o de una degradación muy intensa de la señal que supone un corte del servicio. Se considera como una interrupción, un intervalo de tiempo en el que se produce:

- Un corte parcial o total de la señal
- Aparece un ruido o una BER excesiva

- Surge una fuerte discontinuidad en la señal
- Aparece una intensa distorsión

Las interrupciones largas ( $T_{ind} > T_o$ ) han de tenerse en cuenta para el cálculo de la calidad en torno a disponibilidad y las interrupciones breves (más frecuentes) influyen en el cálculo de la calidad en cuanto a fidelidad. Las interrupciones pueden ser causadas por:

- Fallos o averías en los equipos
- Condiciones anómalas de propagación (lluvia y desvanecimientos)
- Interferencias (internas o externas)

La indisponibilidad total de una ruta de radioenlace se desglosa en dos componentes, indisponibilidad del equipo e indisponibilidad de propagación:

$$U(L) = U_E(N) + U_P(V)$$

Donde,

- $U(L)$  ? Indisponibilidad de una ruta de longitud  $L$
- $U_E(N)$  ? Indisponibilidad del equipo, que se calcula por separado para cada una de las  $N$  secciones de conmutación, sumándose las indisponibilidades parciales.
- $U_P(V)$  ? Indisponibilidad de propagación, que se calcula por separado para cada vano  $V$ , combinándose las indisponibilidades parciales generalmente también de forma aditiva.

El cálculo de la indisponibilidad debida a los equipos,  $U_E$ , suele ser complicado. La ruta total de un radioenlace se divide en diferentes “secciones de conmutación” donde, si existen radiocanales de reserva puede conmutarse la señal proveniente de un radiocanal principal a otro de reserva si está libre.

El complemento a uno de la indisponibilidad de un equipo electrónico, es la fiabilidad. La fiabilidad está relacionada con el tiempo que transcurre entre averías sucesivas del equipo. Se suele modelar este tiempo mediante una variable aleatoria con distribución exponencial negativa de valor medio  $t$ , de forma que la densidad de probabilidad de este tiempo es:

$$p(t) = \frac{1}{\tau} \exp(-t/\tau)$$

Al parámetro  $t$  se le denomina tiempo medio entre fallos, se designa por MTBF (Mean Time Between Failures) y constituye una característica de cada equipo. La probabilidad de que el tiempo entre averías sea superior a un valor dado  $t_o$ , será:

$$p(t > t_o) = \exp(-t_o/\tau)$$

Para establecer la indisponibilidad del equipos es necesario introducir el concepto de tiempo medio de reparación, que designaremos por MTTR (Mean Time to Repair), y que es el valor medio del tiempo que transcurre entre la producción de una avería y el restablecimiento de la operación del equipo. El MTTR depende del diseño del equipo

(facilidad de desmontaje/montaje, diagnóstico de averías, fiabilidad y calidad de los componentes) y de la política de mantenimiento.

La indisponibilidad del equipo viene dada por:

$$U(\%) = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} \times 100 \approx \{MTTR \ll MTBF\} \approx q \times 100$$

donde  $q = MTTR/MTBF$ , es la probabilidad de interrupción de un canal.

Los radioenlaces suelen disponer de reservas activas, que entran en juego en caso de fallos en el enlace principal, según una conmutación multilínea que reemplaza uno de los  $M$  canales indisponibles por uno de los  $N$  canales de reserva o protección a lo largo de  $m$  vanos. En este caso, la indisponibilidad de un canal  $i$ , causada únicamente por averías en los equipos, suponiendo que la tasa de averías de los conmutadores es despreciable, se calcula mediante la expresión:

$$U(\%) = \frac{200}{M} \binom{M+N}{N+1} (mq)^{N+1}$$

#### 4.2.2.2 – CALIDAD DE UN RADIOENLACE EN CUANTO A FIDELIDAD

Encontrándose un radioenlace en condiciones de disponibilidad, pueden aparecer situaciones transitorias de funcionamiento degradado en forma de microcortes o aumento del ruido o distorsión de la señal.

Los criterios de calidad en cuanto a fidelidad, especifican las degradaciones normales y máxima admisible que puede sufrir la información, junto con el tiempo máximo en que no debe rebasarse esa degradación. El parámetro básico de calidad de error de cualquier sistema de transmisión digital, es la Tasa de errores en los bits (BER). Debe resaltarse que la calidad de error de un sistema únicamente se define y evalúa cuando tal sistema se encuentra en estado disponible. Distinguiamos las siguientes situaciones de error:

1. Segundo con errores (ES, Errored Second): Período de tiempo de 1 segundo en el que hay uno o más bits erróneos.
2. Segundo con muchos errores (SES, Severely Errored Second): Período de 1 segundo en el que la tasa de errores BER es mayor que  $10^{-3}$ .
3. Segundo sin errores (EFS, Error Free Second): Período de 1 segundo en que no hay errores de bit.

A partir de estas magnitudes, se han definido los siguientes parámetros de calidad de error:

- Proporción de segundos con errores (ESR: Errored Second Ratio): Cociente entre ES y el número total de segundos de un intervalo de tiempo de medición.
- Proporción de segundos con muchos errores (SESR: Severely Errored Second Ratio): Cociente entre SES y el número total de segundos de un intervalo de tiempo de medición.

Para radioenlaces analógicos, la calidad en cuanto a fidelidad de la señal se expresa bien mediante determinados valores de la relación señal/ruido ( $S/N$ ) en un canal o de ruido en el canal, para una potencia de señal normalizada y ciertos porcentajes de tiempo. En los radioenlaces digitales la calidad se formula en términos de los parámetros ESR y SESR.

La fijación de valores para los parámetros de calidad y para los porcentajes de tiempo equivale, en esencia, a imponer la condición de que el desvanecimiento, causante del incremento del ruido o de la tasa de errores, no supere unos límites determinados durante más de los porcentajes de tiempo establecidos.

Las especificaciones de calidad se establecen y enuncian con respeto al HDRP. Para su aplicación práctica, en circuitos reales que difieren en grado variable del HDRP, se siguen ciertas reglas empíricas de proporcionalidad, que consisten en el mantenimiento de los valores totales de la tasa de error en cada vano y adición lineal de los porcentajes de tiempo de cada vano, para pequeños porcentajes.

Las Recomendaciones ITU-R F.594, F.634, F.696 y F.697 establecen los objetivos de calidad de error para los radioenlaces digitales, en condiciones de disponibilidad para una conexión internacional por la ISDN, que se indican a continuación:

Clasificación del circuito	Clasificación de la calidad	
	ESR	SESR
Grado Local Rec. UIT-R F.697	0,012	0,00015
Grado Medio Rec. UIT-R F.696	0,012	0,0004
Grado Alto Rec. UIT-R F.594	0,0032	0,00054
Rec. UIT-R F.634		