

INFORME 944

PLANIFICACIÓN DE UNA RED TEÓRICA

(Cuestión 46/10, Programa de Estudios 46L/10)

(1982)

1. Introducción

Las redes de transmisores de radiodifusión deben planificarse de manera que la cobertura requerida de la zona se obtenga mediante un número mínimo de frecuencias. Desde un punto de vista estrictamente técnico, la zona de cobertura de un transmisor depende de numerosos factores, entre ellos la potencia de transmisión, la intensidad mínima de campo utilizable, la relación de protección en radiofrecuencia, la distancia entre transmisores que funcionan en el mismo canal o en el canal adyacente, la separación entre canales, la banda de paso en la transmisión y otros factores que influyen en la propagación de las ondas. También depende del sistema de distribución de los canales.

Cuando la planificación o la nueva planificación abarca un gran número de canales para un servicio de radiodifusión sonora MA o MF, la experiencia muestra que la utilización exclusiva de métodos empíricos puede dificultar la explotación eficaz del espectro. Por eso, hacia finales de los años 50 y comienzos de los 60 [UER, 1960] se elaboró una teoría de redes de transmisores uniformes. Este método puede aplicarse con éxito cuando existe cierta uniformidad de normas en el servicio que ha de planificarse. Además, la banda que vaya a planificarse debe estar sometida a unos acondicionamientos mínimos, es decir, que teóricamente deberá tenerse absoluta libertad para asignar cualquier frecuencia a cualquier transmisor.

Esta teoría permite concebir nuevas redes de transmisores o reorganizar redes existentes, pero constituye también un poderoso instrumento para determinar las características técnicas óptimas, como la separación entre canales, las características de los transmisores, etc., así como para determinar la mejor cobertura que pueda obtenerse.

El método descrito a continuación se utilizó ya durante la Conferencia de Planificación de Estocolmo de 1961, la Conferencia Africana de Planificación de 1963 y ha servido para efectuar los estudios preliminares de la Conferencia de Radiodifusión por ondas kilométricas y hectométricas, Ginebra 1975.

2. Teoría de las redes regulares

Como puede verse, en este punto sólo se consideran redes puramente teóricas, lo cual significa que:

- todos los transmisores son idénticos: la potencia radiada y la altura de la antena son las mismas;
- están equipados con antenas no direccionales;
- la propagación es isotrópica e independiente de la frecuencia, al menos en la banda que va a planificarse;
- se supone que, desde el punto de vista del cálculo de las distancias, la zona de planificación es plana, la población está distribuida de manera uniforme con respecto a su superficie, y no hay fronteras políticas ni naturales.

En estas condiciones, y suponiendo interferencias insignificantes, la zona de cobertura, es decir, la región donde puede obtenerse una buena recepción con un receptor doméstico normal, está limitada por el contorno dentro del cual la intensidad de campo electromagnética del transmisor es superior o igual al valor necesario para obtener una relación señal/ruido dada. En la situación ideal que acaba de describirse, este contorno es circular y su radio depende del tipo de servicio y de las leyes de propagación válidas en la banda de frecuencias considerada. Si se quiere cubrir totalmente la zona de planificación mediante zonas semejantes de cobertura circular, es evidente que su número se reducirá al mínimo situando los transmisores en los vértices de una red de triángulos equiláteros (véase la fig. 1). Se verá que no hay un transmisor por triángulo, sino un transmisor por cada par de triángulos que forman rombo (superficie sombreada de la fig. 1). Se trata de una observación que no debe perderse de vista al calcular la eficacia de una red.

Con tal estructura, todo punto de la zona de planificación es servido, al menos, por un transmisor, y la superposición de las zonas de cobertura es la menor posible. A continuación, tomaremos como unidad de longitud el lado del triángulo equilátero elemental. El número de transmisores por unidad de superficie es entonces igual a uno por rombo elemental cuya superficie es $\sqrt{3}/2$. La eficacia de la red se expresa mediante la relación entre la superficie total donde el servicio es de buena calidad (la zona del rombo elemental) y la suma de las zonas de cobertura (que se superponen entre sí). El valor más alto se obtiene con una red regular de triángulos equiláteros: es igual a 0,83 (cada transmisor tiene una zona de cobertura $\pi/3$, cuyo radio es de $\sqrt{3}/3$). El valor 1, que sería evidentemente el ideal, no puede obtenerse, puesto que no es posible cubrir una superficie con círculos sin zonas que se superpongan. Con una red regular de cuadrados (o de triángulos rectángulos isósceles), la relación sólo es igual a 0,64 (cada transmisor tiene una zona de cobertura de $\pi/2$, cuyo radio es de $\sqrt{2}/2$).

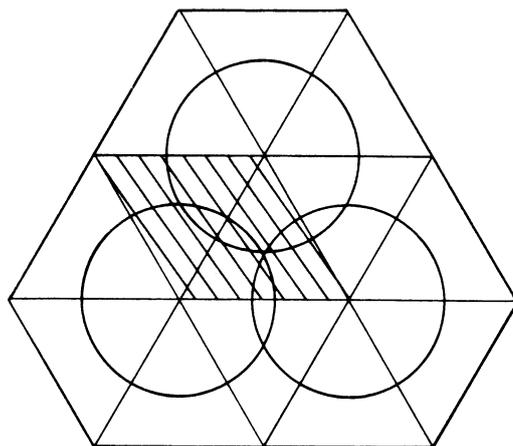


FIGURA 1 – Emplazamientos y zonas de cobertura de transmisores de radiodifusión idénticos distribuidos según una red regular

Debe señalarse que las redes de transmisores actuales no son regulares en el plano geométrico y que sus características técnicas no corresponden a las de la red teórica. La desviación de la regularidad geométrica, por un lado, y de la potencia y la altura de la antena de la red teórica con respecto a valores inferiores, por otro, se traducirá inevitablemente en una menor eficacia de la red. Los resultados de estudios relativos a redes teóricas permiten, empero, tener una idea bastante precisa de la relación entre estos factores y la eficacia de la red.

3. Ejemplo de la red teórica

En primer lugar, se supone que la banda de frecuencias disponible se ha dividido, en forma apropiada, en canales suficientemente anchos para poder colocar un programa de radiodifusión sonora o de televisión, separados de tal manera (9 kHz para la radiodifusión sonora MA, 100 ó 200 kHz para la radiodifusión con modulación de frecuencia, 6 u 8 MHz para la televisión (200 kHz y 6 MHz corresponden a los canales americanos)) que la interferencia en el mismo canal predomine con respecto a la del canal adyacente.

De esta manera se obtiene fácilmente, a partir de tal separación entre canales, el número de los que han de utilizarse en la planificación. Como se trata de un número evidentemente finito, será inevitable repetir, a mayor o menor distancia del punto de partida de las asignaciones, el primer canal atribuido. El número de canales necesario para abarcar toda la zona de planificación es tanto más reducido cuanto más corta es la distancia D , suficiente para que no aparezca ninguna interferencia entre dos transmisores en el mismo canal. Sin embargo, es necesario que D sea suficientemente grande para que los dos transmisores que funcionan en el mismo canal no se interfieran mutuamente.

No es difícil evaluar D . Utilizando las curvas de propagación apropiadas, se calculan a lo largo del círculo que limita la zona de cobertura de cada transmisor, conforme se define en el punto 2, para ciertos porcentajes de tiempo (véanse las Recomendaciones 368 y 370), las intensidades de campo del transmisor deseado y del transmisor interferente. Se elegirá una longitud de D suficiente para que la diferencia entre esas dos intensidades de campo, expresada en dB, sea superior a la relación de protección correspondiente que figura en las Recomendaciones 560, 412 y 418, así como en el Informe 306. A continuación se examinará el caso de interferencias múltiples.

Con N canales pueden cubrirse N rombos elementales, es decir, una superficie igual a $N\sqrt{3}/2$, tomando como unidad de superficie el área de un cuadrado cuyo lado es igual al de un triángulo elemental. De esta manera, aparece un nuevo tipo de cobertura sirviéndose de rombos que comprenden N rombos elementales, en cuyo caso no hay ninguna razón para dudar de la conclusión a que se llega en el punto 2: determinado canal se repetirá en cada uno de los nodos de una red de rombos en que la diagonal más corta es igual a los lados y cuya superficie es igual a $N\sqrt{3}/2$. Ese rombo se denominará «rombo cocanal»; la longitud D de sus lados en \sqrt{N} (es decir, \sqrt{N} veces el lado de un triángulo elemental). Presentaremos las propiedades de las redes de rombos mediante un ejemplo sencillo, donde $N = 13$ (véase la fig. 2).

- *Periodo*: Todos los rombos cocanal son idénticos. Aparece una periodicidad bidimensional que puede recordar la teoría de las funciones elípticas.
- *Distribución de los canales*: Dentro de un rombo cocanal podrían disponerse los canales de manera aleatoria, siempre y cuando se encontraran en nodos homólogos en cada rombo. Pero tal distribución aleatoria no es conveniente si, como ocurre normalmente, es preciso tomar en consideración otras interferencias distintas de la interferencia cocanal. Como puede estimarse que una red homogénea conduce a la utilización más eficaz del espectro, las señales interferentes han de tener el mismo nivel en cualquier canal, sea cual fuere el transmisor.

Por tanto, si, habida cuenta de la relación de protección entre transmisores en los canales adyacentes (que denominaremos aquí transmisores de 1 canal, lo mismo que para separaciones de dos canales se llamarán transmisores de dos canales, etc.), se coloca el canal 1 en un nodo que se halla a suficiente distancia del canal 0, se define para el canal 1 un rombo cocanal separado con relación al rombo cocanal del canal 0, por el vector $\vec{01}$. Según los requisitos de homogeneidad enunciados anteriormente, el canal 2 se colocará en un nodo tal que $\vec{12} = \vec{01}$, y así sucesivamente para los demás canales, cayendo el canal N en el canal 0. Si se considera la red de 13 canales de la fig. 2, se verá que si alguien se desplazara siguiendo las rectas de la red elemental hallaría números de canal en progresión aritmética, módulo 13. Partiendo del canal 0 y andando hacia el Oeste, encontraría los canales: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 0, etc. Por tanto, es sumamente fácil definir toda la red partiendo de la progresión en dos sentidos distintos: + 2 avanzando hacia la izquierda, + 5 avanzando hacia la esquina superior derecha.

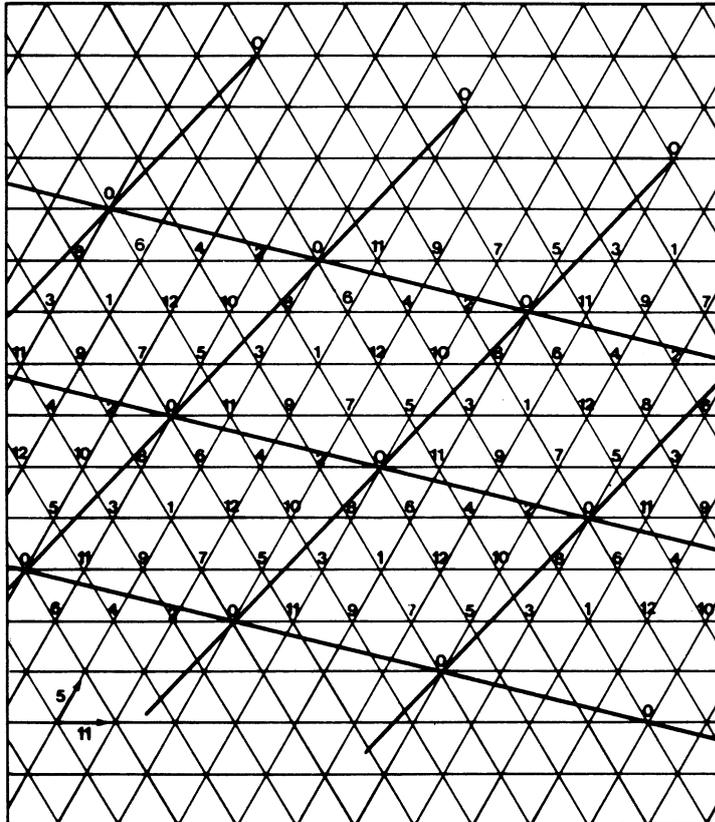


FIGURA 2 - Ejemplo de red regular óptima de 13 canales

4. Redes ideales y no ideales

Para simplificar los cálculos, conviene referir el plano a dos ejes de coordenadas, pero formando entre sí un ángulo de 60° en lugar de 90° , que es lo habitual (véase la fig. 3).

Como sabemos, el lado del rombo cocanal tiene una longitud \sqrt{N} , pero es preciso que los vértices del rombo coincidan con las intersecciones de la red elemental. En el sistema de coordenadas oblicuas, la distancia de un punto de coordenadas (x, y) en el origen es igual a:

$$(x^2 + xy + y^2)^{1/2} *$$

Si existen números enteros a y b , como $a^2 + ab + b^2 = N$ (números de canales) existe un rombo cocanal cuyos vértices coincidan con las intersecciones de la red elemental. $N = 13$ corresponde al caso en que $a = 3$ y $b = 1$. En adelante, tales números se denominarán «números rómicos». En la fig. 4 pueden verse algunos de ellos.

* Todas las distancias que se mencionan en este punto se calculan de acuerdo con esta fórmula y se expresan como múltiplos de unidades iguales a la longitud de uno de los lados de un triángulo elemental.

La elección de a y b está sometida a otras restricciones: es preciso que no tengan ningún divisor común, ni entre sí ni con N , y que ninguno de ellos sea igual a cero. Por ejemplo, si todos fueran pares, sólo aparecerían dos canales pares. A continuación se considerará la otra restricción. La teoría se aplica, por lo demás, si N no es un número rómbico. En este caso ya no se trata de un rombo cocanal, sino de un paralelogramo cocanal, de superficie N . El paralelogramo tiene evidentemente lados desiguales, y uno de ellos es, pues, inferior a \sqrt{N} ; por tanto, esta distancia cocanal es ligeramente más corta que para el rombo.

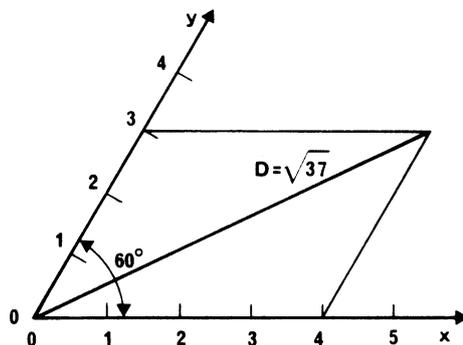


FIGURA 3 – Sistema de coordenadas para una red regular

$\begin{matrix} a \\ b \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3	7	13	21	31	43	57	73	91	111	133	157
2			19		39		67		103		147	
3				37	49		79	97		139		
4					61		93		133			
5						91	109	129	151			
6							127					

FIGURA 4 – Cuadro de números rómbicos

La red de la fig. 5 comprende 26 canales, y 26 no es un número rómbico. Sin embargo, en este caso particular, se observa que la distancia cocanal más corta es el lado más corto del paralelogramo cuya longitud es igual a 4,358. Este número no es muy inferior a la distancia $\sqrt{N} = 5,099$, que se hubiera obtenido si 26 fuera un número rómbico. Las longitudes de las otras distancias cocanal, por ejemplo el lado más largo del paralelogramo o su diagonal más corta, son, respectivamente 5,291 y 6,082. El número rómbico siguiente es 31 para el que se da un ejemplo en la fig. 6.

La red de la fig. 7 comprende 120 canales, y 120 no es un número rómbico. Sin embargo, en este caso particular, se observa que la distancia cocanal más corta es la diagonal cuya longitud es igual a 10,58. Las longitudes de los lados son 11,53 y 10,82, respectivamente. Ninguno de estos números es muy inferior a la distancia $\sqrt{N} = 10,95$, que se hubiera obtenido si 120 fuera un número rómbico. Es posible que esta red no sea óptima para planificación en ondas métricas.

Cuando N no es un número rómbico se ofrecen las tres posibilidades siguientes:

- no tener en cuenta este valor N y determinar el número rómbico más próximo que pueda sustituirlo (por ejemplo, 111; véase la fig. 4);
- examinar la retícula regular resultante, a pesar de que consista en paralelogramos;
- deformar la retícula de manera que los paralelogramos cocanal se conviertan en rombos. En este caso, los rombos elementales se convertirán en paralelogramos, y disminuirá la eficacia de la red. Tal disminución será ligera cuando N sea bastante importante.

La mejor elección entre estas tres posibilidades depende de las circunstancias que hayan de tomarse en consideración.

No siempre es fácil hallar los pasos de progresión para que el canal asignado en el origen de la red reaparezca en los vértices del rombo o paralelogramo cocanal. Remitiendo la fig. 2 al sistema de coordenadas de la fig. 3, se verá que el paso p en el eje de x y el paso q en el eje de y deben corresponder a las siguientes ecuaciones:

$$1 \cdot p + 3 \cdot q = kN \quad \text{y} \quad 4 \cdot p - 1 \cdot q = k'N$$

k y k' enteros.

En la fig. 2, $p = 11$, $q = 5$, $k = 2$ y $k' = 3$, para $N = 13$. En dicha fig. 2 se indican estos casos. Con los números no rómbicos hay más de un paralelogramo, y para hallar el mejor hay que proceder a varios tanteos [Arnaud, 1962]. Incluso con los números rómbicos existe a veces más de un rombo cocanal, como ocurre en el caso de $N = 91$ (véase la fig. 4 para 9 y 1 ó 6 y 5).

Si uno de los números a y b es nulo, el resultado carece de interés. Si, por ejemplo, $b = 0$, los lados del rombo cocanal coinciden con los ejes x e y , y $a = \sqrt{N}$. Como la suma de los pasos a lo largo de los ejes debe ser igual a N de un vértice a otro, su valor es un múltiplo de \sqrt{N} , y sólo se colocan en la retícula los canales múltiplos de \sqrt{N} .

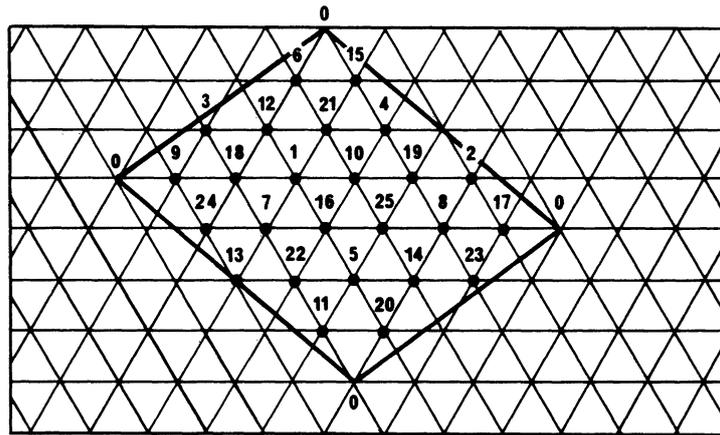


FIGURA 5 - Red de 26 canales

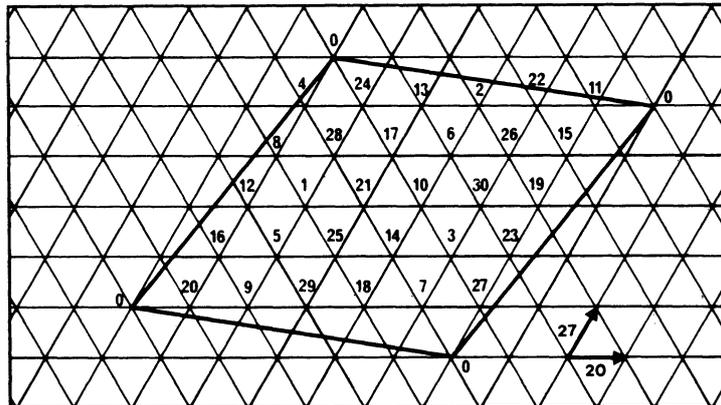


FIGURA 6 - Ejemplo de red regular óptima de 31 canales

5. Cálculo de las interferencias

5.1 Interferencia en el mismo canal

En el punto 3 se ha explicado la manera de calcular el número mínimo de canales necesarios a partir de las relaciones de protección y de las curvas de propagación, pero teniendo únicamente en cuenta un solo transmisor interferente. En la fig. 8 se representa cierto número de rombos cocanal de lado D ; el transmisor deseado se encuentra en el centro, y los 18 que lo rodean son interferentes. En radiodifusión por ondas métricas y decimétricas, la zona de cobertura se estima mediante las curvas de propagación de la Recomendación 370 que dan la intensidad de campo rebasada durante el 50% o el 1% del tiempo (para el transmisor deseado o interferente, respectivamente), teniendo estrictamente en cuenta las características del transmisor (p.r.a., altura de

la antena, frecuencia) y de la intensidad de campo mínima utilizable (véase la Recomendación 412). Como se ha visto en el punto 2, el radio de la zona de cobertura era igual a $\sqrt{3}/3$ el lado del rombo elemental. Se conoce, pues, la dimensión de la retícula. Los seis primeros transmisores interferentes se hallan a la distancia $D = \sqrt{N}$ y, en primera aproximación, se admitirá que D es bastante grande para que la intensidad de campo interferente sea aproximadamente la misma en el emplazamiento del transmisor interferido y en el límite de su zona de cobertura. En un estudio más preciso, habría que calcular la relación señal deseada/señal interferente en el límite de la zona, al menos en los 6 puntos indicados con los números romanos I a VI en la fig. 8.

Es preciso que D sea suficientemente grande para que la diferencia (en decibelios) entre la intensidad de campo deseada rebasada durante el 50% del tiempo y las intensidades de campo interferentes combinadas rebasadas durante el 1% del tiempo sea superior o igual a la relación de protección en el mismo canal. Después, habrá de comprobarse que los 12 transmisores situados sobre el segundo hexágono (véase la fig. 8) no tienen ninguna influencia, como ocurre generalmente, salvo si D es muy pequeña.

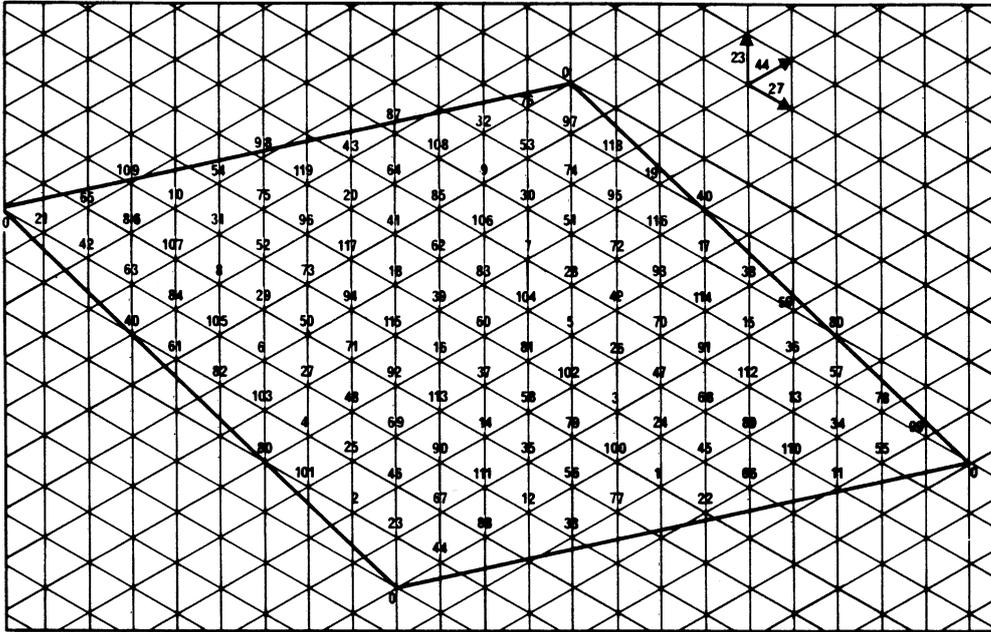


FIGURA 7 - Red de 120 canales

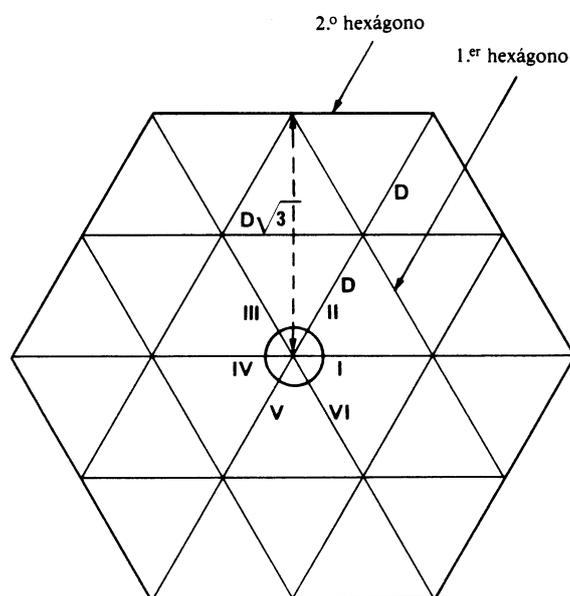


FIGURA 8 - Emplazamientos de los transmisores cocanal

5.2 Interferencia por el canal adyacente

A título de ejemplo, tomemos la red de la fig. 2. Supongamos, pues, que D es igual a $\sqrt{13}$. Como la red es regular, puede estudiarse cualquiera de los canales. Consideremos, por ejemplo, el canal 7. Los canales adyacentes se encuentran a las distancias $\sqrt{3}$ y 2. En los canales adyacentes hay 4 transmisores interferentes principales. Como en el caso de la interferencia en el mismo canal, se estudiará en primer lugar la situación en el propio emplazamiento del transmisor, y luego, si la relación señal deseada/señal interferente sólo difiere ligeramente de la relación de protección en los puntos más críticos situados en el límite de la zona de cobertura. Los otros transmisores del canal adyacente se encuentran mucho más lejos. Sus distancias son $\sqrt{7}$, $\sqrt{12}$, $\sqrt{13}$, etc.

En todo rombo cocanal hay al menos dos transmisores en canales adyacentes $C + 1$ y $C - 1$ que pueden causar interferencia al transmisor del canal C . La red será tanto mejor cuanto más lejos de los vértices del rombo cocanal C se encuentren los transmisores $C + 1$ y $C - 1$; las posiciones ideales serán los centros de gravedad de los dos triángulos equiláteros que forman un rombo. Por tanto, si el transmisor $C + 1$ se hallara exactamente en uno de esos centros de gravedad, $C + 2$ se encontraría situado exactamente en el otro, y $C + 3$ coincidiría con C , lo que es absurdo. Esta particularidad se daría con la red de $N = 21$ canales. Si la coincidencia de un nudo de la red con uno de los centros de gravedad sólo es aproximada, el canal $C + 2$ estará dos veces más lejos del centro de gravedad del triángulo. Sin embargo, el canal $C + 3$ seguirá bastante cerca del canal C , lo que es un inconveniente en radiodifusión sonora con modulación de frecuencia, puesto que esto corresponde a una separación de portadoras de 300 kHz (en algunas partes de Europa) en la que la relación de protección sólo es ligeramente negativa (-7 dB).

5.3 Interferencia múltiple

Tanto en la teoría como en la práctica, hay que tener en cuenta más de un transmisor interferente. En el emplazamiento del transmisor deseado en la red de la fig. 2 hay 6 transmisores interferentes en el mismo canal con una intensidad prácticamente idéntica, a los que se agregan cuatro transmisores interferentes en el canal adyacente. No debe olvidarse que también es preciso tener presente transmisores de 2 y 3 canales, como mínimo. En la práctica, se revela interesante calcular por computador la intensidad de campo deseada sobre la base de las 16 fuentes, como mínimo, que presentan el mayor riesgo de interferencia. Sin embargo, en esta descripción de un método de planificación no se trata de preconizar uno u otro método para calcular los efectos de la interferencia múltiple.

6. Condicionamientos de planificación

Al planificar determinado servicio, hay que tener presentes varios condicionamientos, la mayoría de los cuales dependen de la concepción del receptor. Conviene establecer una distinción entre los condicionamientos internos y los externos. Esos condicionamientos y sus mecanismos generadores se examinan en el Informe 946.

7. Utilización de las redes teóricas

Estas redes pueden ser sumamente valiosas para elegir, con miras a la planificación, las características óptimas de los transmisores [Sauvet-Goichon, 1980], las características de modulación y la separación entre canales. Hay muchas posibilidades de que la solución que resulte mejor para una red teórica lo sea también para una red real. En todo caso, será la más adecuada para un tratamiento informático.

7.1 Red simple

La banda disponible, de una anchura de 16 MHz, se divide en 159 canales. El número róbico más alto inferior a 159 es 157 (12 y 1, véase la fig. 4). Quedan, pues, dos canales no utilizados que podrán eventualmente sustituir a los excluidos por incompatibilidades locales (véase el punto 6) o colmar lagunas que surjan en regiones montañosas o cerca de las fronteras. En efecto, desde cada centro de transmisión se difunden varios programas; con tal fin, varias asignaciones próximas se llevarán al mismo punto. En las figs. 9 y 10 se exponen dos ejemplos de esos desplazamientos: las asignaciones que la red teórica atribuye a los ángulos de las zonas sombreadas se concentrarán en un solo punto. Deberá comprobarse que esto no entraña un aumento inadmisibles de las interferencias.

En la fig. 11 se indica cómo está constituida una red de 157 canales. En el anexo I se explica la manera de hacerlo. El Plan de Estocolmo de 1961 para la televisión por ondas decimétricas se basa en la agrupación C , $C + 3$, $C + 6$.

7.2 Redes múltiples

Cuando hay un gran número de canales (más de una cincuenta) y, como es habitual, cada centro comprende varios transmisores, es posible dividir la banda disponible total en sub-bandas, conteniendo cada una de ellas el mismo número de canales y estando eventualmente reservada a un programa distinto. Se observará que los canales del Plan Africano tienen una separación de 86 kHz, por lo que en 16 MHz hay 185 canales, es decir, 6 redes de 31 canales o 5 redes de 37 canales (37 es un número róbico).

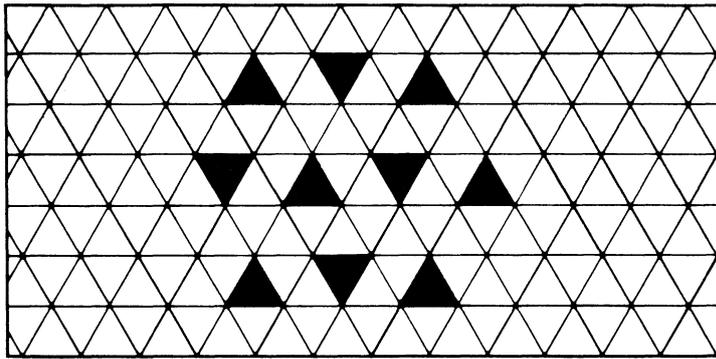


FIGURA 9 – Agrupación de canales vecinos

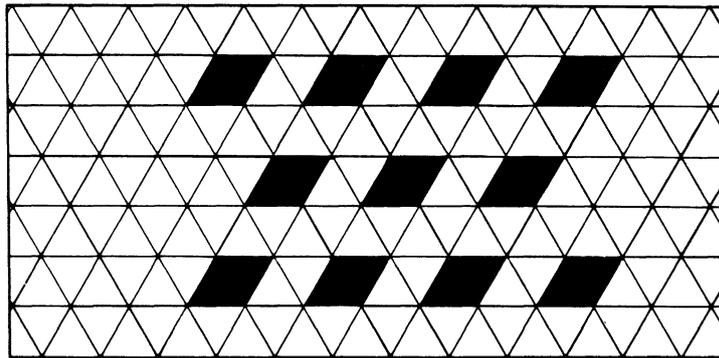


FIGURA 10 – Agrupación de canales vecinos

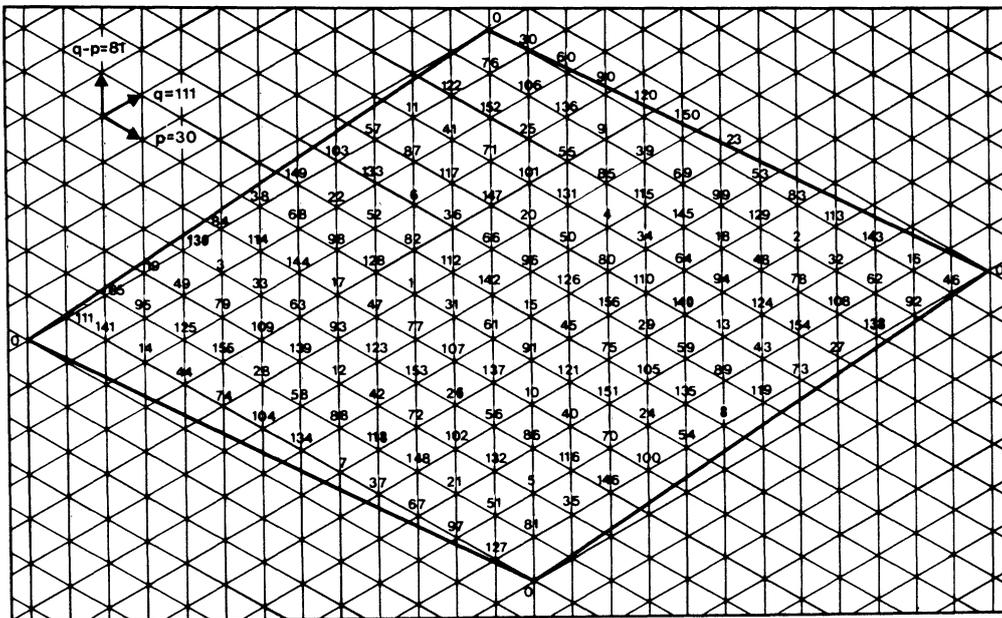


FIGURA 11 – Ejemplo de red regular óptima de 157 canales

8. Número de canales necesarios para la cobertura completa de una zona con un programa de radiodifusión sonora en ondas métricas

8.1 Consideraciones generales

Sobre la base del método anteriormente examinado, se evaluó el número de canales necesarios para la difusión de un programa radiofónico en ondas métricas con cobertura total.

Las investigaciones se hacen para diferentes distancias medias de los transmisores, dos alturas de antena (300 y 600 m), dos factores de cobertura (90% y 100%) y una potencia radiada aparente de 100 kW. Se tuvieron en cuenta los servicios monofónicos y estereofónicos. El cálculo de las interferencias se realizó utilizando el método de multiplicación simplificado (véase el Informe 945).

Este método se había utilizado previamente en:

- la Conferencia Europea de Radiodifusión, Estocolmo, 1961,
- la Conferencia Africana de Radiodifusión, Ginebra, 1963.

8.2 Realización de los cálculos

8.2.1 Hipótesis básicas

Las investigaciones se basan en redes ideales de una retícula regular de transmisores, distribución uniforme de canales y triángulos cocanales equiláteros. Los triángulos denominados elementales que se forman por tres transmisores vecinos no son en este caso equiláteros en general, sino sólo para determinados números de canales [UER, 1960].

Los cálculos se basan en las condiciones siguientes:

- intensidad de campo $E(50,50)$ (Recomendación 370),
- intensidad de campo $E(50,1)$ (Recomendación 370),
- relaciones de protección (Recomendación 412),
- variación local de la intensidad de campo: 8,3 dB,
- antena receptora:
 - monofonía : omnidireccional,
 - estereofonía : direccional con una relación anterior/posterior de 12 dB,
- intensidad de campo mínima utilizable (Recomendación 412):
 - monofonía : 48 dB(μ V/m),
 - estereofonía : 54 dB(μ V/m),
- separación de canales: 100 kHz.

8.2.2 Cálculo de la intensidad de campo utilizable

8.2.2.1 Método de cálculo

El cálculo de estas interferencias se realizó utilizando el método de multiplicación simplificado.

La experiencia de algunos países ha mostrado que la situación de cobertura en la práctica real concuerda aceptablemente, por término medio, con los resultados de los cálculos obtenidos con el método de multiplicación simplificado. En los puntos siguientes sólo se ha utilizado este último método para la determinación del número necesario de canales.

8.2.2.2 Número de transmisores interferentes

Para el cálculo de las interferencias en la retícula teórica se tuvieron en cuenta los 18 transmisores cocanal interferentes más fuertes y los 40 transmisores interferentes más fuertes en canales adyacentes con separaciones de frecuencias de hasta 400 kHz. (El número relativamente grande de transmisores interferentes en canales adyacentes es pertinente solamente con separaciones de canal pequeñas.)

8.2.3 Variación de los parámetros

La distancia media de los transmisores se varió entre 40 y 120 km en vanos de 10 km. Para la altura efectiva de la antena del transmisor se eligieron 300 y 600 m, debido a que los valores de altura medios en muchos países europeos están en esa gama. La potencia radiada aparente se fijó en 100 kW, para asegurar que la interferencia en vez del ruido limitaría la zona de cobertura, siendo ésta una condición para la utilización eficaz del espectro (véase el Informe 414 (Kyoto, 1978)). Sin embargo, para distancias pequeñas entre los transmisores una potencia mucho menor proporcionaría el mismo porcentaje de cobertura con el mismo número de canales.

8.2.4 Resultados

En las figs. 12 a 15 se indica el número de canales necesarios en una red teórica en diferentes condiciones. Para un servicio monofónico con antena receptora omnidireccional y un servicio estereofónico con antena receptora directiva (eficacia direccional de 12 dB), el número de canales necesarios es casi igual.

En una red teórica ideal basada en las hipótesis anteriores con una altura efectiva de la antena del transmisor de 300 m, una potencia radiada aparente de 100 kW y una distancia media entre transmisores mayor de 70 km:

- para una cobertura del 90% se necesitan unos 25 canales (fig. 12);
- para una cobertura del 100%, se necesitan unos 31 canales (fig. 13).

En las figs. 5 y 6 se dan ejemplos de distribuciones de canales posibles para los números de canales correspondientes.

El número de canales necesarios para un programa en una red teórica sólo puede dar una aproximación del número necesario en una red real. Mientras menos uniforme sea la red real considerada, se necesitarán más canales suplementarios. De acuerdo con la experiencia obtenida con redes existentes en la gama 87,5-100 MHz, en la Europa continental es posible transmitir hasta cuatro programas en esta gama.

Sobre la base del estudio teórico y la experiencia práctica, cabe suponer que para toda la banda de frecuencias 87,5-108 MHz deben ser posibles:

- unos siete programas para una cobertura del 90%;
- unos seis programas, para una cobertura del 100%.

En redes prácticas, la potencia y la altura efectiva de la antena de un transmisor cualquiera debe dejarse en el más bajo valor posible para obtener la cobertura deseada.

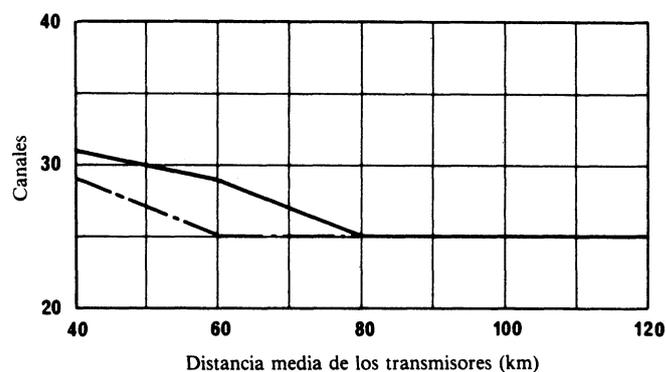


FIGURA 12 - Número de canales necesario en una red teórica para una cobertura del 90 % y una altura de la antena de 300 m

— · — : Monofonía (antena omnidirectiva 0 dB)
 — : Estereofonía (antena de eficacia directiva igual a 12 dB)

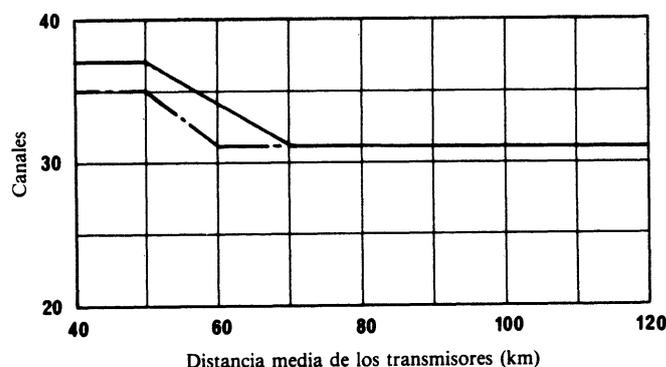


FIGURA 13 - Número de canales necesario en una red teórica para una cobertura del 100 % y una altura de la antena de 300 m

— · — : Monofonía (antena omnidirectiva 0 dB)
 — : Estereofonía (antena de eficacia directiva igual a 12 dB)

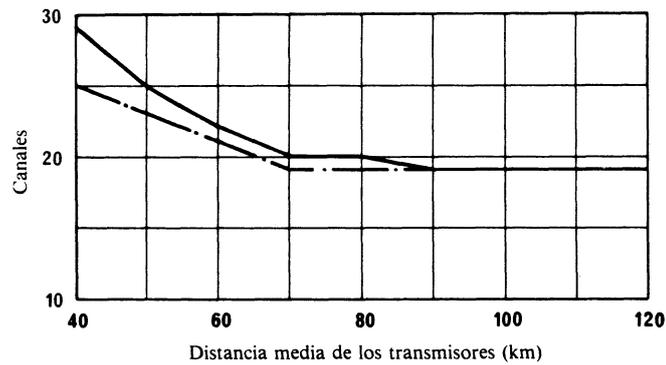


FIGURA 14 - Número de canales necesario en una red teórica para una cobertura del 90 % y una altura de la antena de 600 m

--- : Monofonía (antena omnidirectiva 0 dB)
 — : Estereofonía (antena de eficacia directiva igual a 12 dB)

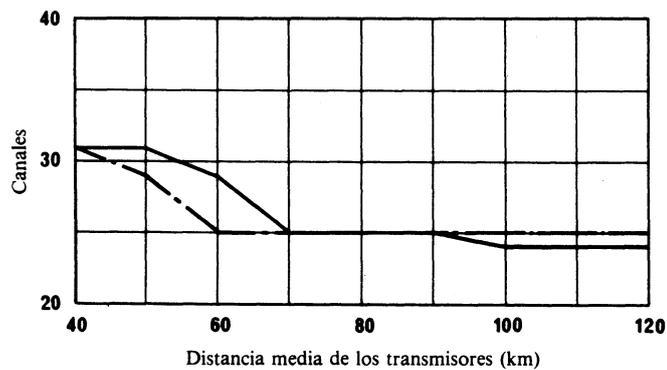


FIGURA 15 - Número de canales necesario en una red teórica para una cobertura del 100 % y una altura de la antena de 600 m

--- : Monofonía (antena omnidirectiva 0 dB)
 — : Estereofonía (antena de eficacia directiva igual a 12 dB)

9. Conclusiones

Cuando el número de canales es elevado, parece difícil lograr la mejor utilización del espectro de frecuencias con medios meramente empíricos. La teoría de las redes regulares parece ser un instrumento eficaz para lograr un resultado óptimo. Más aún, en una zona en la que la superficie de la Tierra está dividida entre muchos países, es un buen medio para asegurar que cada uno obtiene una parte equitativa del espectro. También podría ser de utilidad el tomar en consideración los medios de planificar redes irregulares, en aquellos casos especiales en que ello puede ser más adecuado.

ANEXO I

ELECCIÓN DE PASOS DE PROGRESIÓN EN
UNA RED ÓPTIMA DE 157 CANALES

Se han estudiado sistemáticamente todos los números rómicos inferiores a 160, calculando las distancias para 1, 2 y 3 canales en todos los juegos de valores de p y q .

A continuación (cuadro I) se indican algunos resultados que se han considerado interesantes (para simplificar la presentación, se dan los cuadrados de las distancias). El cuadro I está limitado a $N = 100$, para que no sea demasiado amplio.

CUADRO I

	p	q	Adyacente	2 canales	3 canales
$N = 19$ ($a = 3, b = 2$)	6	10	4	3	3
$N = 31$ ($a = 5, b = 1$)	7	27	7	7	3
$N = 37$ ($a = 4, b = 3$)	6 9	29 25	9 9	3 7	7 3
$N = 39$ ($a = 5, b = 2$)	4	29	7	7	9
$N = 43$ ($a = 6, b = 1$)	5	13	12	7	3
$N = 49$ ($a = 5, b = 3$)	12	29	13	9	3
$N = 57$ ($a = 7, b = 1$)	11	37	13	7	9
$N = 61$ ($a = 5, b = 4$)	6 15	23 27	13 16	7 13	12 3
$N = 67$ ($a = 7, b = 2$)	4 8 21	53 39 27	13 19 12	13 13 7	12 3 13
$N = 73$ ($a = 8, b = 1$)	5 6 7 11	33 25 17 58	19 13 19 12	7 9 19 13	12 16 3 19
$N = 79$ ($a = 7, b = 3$)	4 6 11 22	17 65 27 54	13 16 19 21	19 7 9 19	21 19 12 3
$N = 91$ ($a = 6, b = 5$)	4 9 15	68 62 73	16 21 25	19 13 21	21 12 3
$N = 91$ ($a = 9, b = 1$)	4 6 8	55 37 19	19 19 27	21 9 19	12 21 3
$N = 93$ ($a = 7, b = 4$)	5 17	61 40	25 16	13 13	9 21
$N = 97$ ($a = 8, b = 3$)	6 13 26	81 30 60	19 21 28	13 19 21	21 12 3

A continuación se indican a modo de ejemplo los detalles de los cálculos que permiten hallar los mejores pasos para $N = 157$ canales.

Como $157 = 12^2 + 12 \cdot 1 + 1^2$, los pasos p y q deben ser tales que:

$$12p + q = 0 \text{ módulo } 157$$

y ser superiores a 3, para que las zonas de cobertura de los canales C y $C + 1$, $C + 2$ o $C + 3$ no se superpongan.

Ensayemos, pues, $p = 4$ y $q = 109$. Entonces, $q - p = 105$ (véanse en la fig. 11, las definiciones de p , q , $p - q$). Se plantea entonces la cuestión de saber dónde aparece el canal 1 (o 156), puesto que aquí se parte del rombo cocanal 0. Como la red es homogénea y regular, puede partirse de cualquier canal. La posición ideal del canal 1 sería el centro de gravedad de uno de los triángulos que forman el rombo cocanal. Su distancia con el canal 0 sería entonces:

$$\sqrt{157} \times \sqrt{3}/3 = 7,23$$

Para $p = 4$ y $q = 109$, el canal 1 cae a 3 pasos en la dirección $q - p = 105$ y $3 \times 105 = 315 = 1$ módulo 157. Esta distancia de tres pasos es bastante más corta que la máxima de 7,23.

Para $p = 5$ y $q = 97$ ($q - p = 92$), el canal 156 se hallará después de haber recorrido 5 pasos $q - p$ y 2 pasos p ; en efecto, $5 \times 92 + 2 \times 5 = 470 = 156$ módulo 157. La distancia del canal adyacente es entonces $\sqrt{19}$. Cabe esperar que exista una solución mejor.

Para $p = 6$ y $q = 85$ ($q - p = 79$), el canal 1 se encuentra a 2 pasos, puesto que $2(q - p) = 158 = 1$ módulo 157. Se encuentra mucho más cerca.

Para $p = 7$ y $q = 73$ ($q - p = 66$), el canal 156 se encuentra a 3 pasos p más 4 pasos q , $3 \times 7 + 4 \times 73 = 313 = 156$ módulo 157. La distancia de 1 canal es entonces $\sqrt{37} = 6,08$. Los canales 156 y 1 se encuentran cerca de los centros de gravedad de los triángulos, así como los canales 155 y 2; los canales 154 y 3 se encuentran a $\sqrt{12}$ del canal 0. Una búsqueda sistemática entre todos los pares (p, q) muestra que sólo algunos de ellos dan una distancia de 1 canal superior o igual a 6. Los resultados se presentan en el siguiente cuadro II.

CUADRO II

p	q	Adyacente	2 canales	3 canales
7	73	$\sqrt{37}$	$\sqrt{39}$	$\sqrt{12}$
11	25	$\sqrt{48}$	$\sqrt{37}$	$\sqrt{3}$
20	74	$\sqrt{37}$	$\sqrt{21}$	$\sqrt{21}$
24	26	6	1 ⁽¹⁾	
30	111	$\sqrt{39}$	$\sqrt{19}$	$\sqrt{21}$
33	75	$\sqrt{39}$	$\sqrt{7}$	$\sqrt{48}$

(1) Esto elimina la combinación.

La elección definitiva depende de las relaciones de protección de 2 y 3 canales. El par (24, 26) no será conveniente.

Si se desea reunir los canales por grupos de 3 ó 4 (véanse las figs. 9 y 10), es mejor que los pasos sean superiores a 20, por ejemplo, para evitar dificultades de multiplaje [Arnaud, 1962]. La fig. 11 representa una red de ese tipo, correspondiendo a $p = 30$ y $q = 111$. De no preverse agrupación, o de ser aceptable una separación de 20, la red $p = 20$ y $q = 74$ es ligeramente mejor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNAUD, J. F. [marzo de 1962] Projets théoriques de répartition des fréquences de la bande II à un réseau d'émetteurs groupés en centres d'émission. *L'onde électrique*, **420**, 208-218.
- UER [mayo de 1960] Méthodes nouvelles d'établissement des plans d'assignation de fréquence pour la télévision. *Doc. Tech.* 3080. Unión Europea de Radiodifusión, Bruselas.
- SAUVET-GOICHON, D. [noviembre de 1980] Radiodiffusion sonore à modulation de fréquence. Etude théorique du nombre de canaux nécessaires en fonction du nombre et des caractéristiques techniques des émetteurs. Documento TDF (DTR/11-0/80), **1015**.

BIBLIOGRAFÍA

- ARNAUD, J. F. [diciembre de 1980] Frequency planning for broadcast services in Europe. *Proc. IEEE*, Vol. 68, **12**, 1515-1522.
- ARNAUD, J. F. [abril-mayo de 1981] Planification des fréquences pour la radiodiffusion en Europe. *Rev. Radiodif. Télév.*, **67**.

INFORME 945-2*

MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE MÚLTIPLES INTERFERENCIAS

(Cuestión 46/10, Programa de Estudios 46L/10)

(1982-1986-1990)

1. Introducción

La intensidad de campo utilizable, E_u , se define en la Recomendación 638 y puede utilizarse como criterio para la evaluación de una situación de interferencia en un determinado canal y en una determinada zona. Tiene en cuenta, en principio, el ruido natural y el ruido artificial, así como el efecto combinado de la totalidad de los transmisores interferentes. Si la intensidad de campo utilizable es grande, la influencia de los transmisores interferentes también es grande; por el contrario, esta influencia es reducida si la intensidad de campo utilizable es pequeña.

La intensidad de campo utilizable es independiente de las características del transmisor deseado y normalmente no presenta variaciones importantes con la ubicación. La intensidad de campo utilizable puede determinarse para cualquier ubicación de interés. A efectos de la planificación internacional, puede ser conveniente calcular el valor de la intensidad de campo utilizable en el emplazamiento del transmisor deseado. Este valor puede considerarse, en primera aproximación, representativo de la situación en toda la zona de cobertura.

Fundamentalmente, se utilizan dos clases de métodos para calcular el efecto combinado de todas las fuentes de interferencia:

- métodos estadísticos,
- métodos no estadísticos.

Se emplea normalmente el "método de la multiplicación simplificada", como ejemplo de método estadístico y el "método de la suma cuadrática", como método no estadístico. También se han obtenido valiosos conocimientos mediante el uso del método estadístico "log-normal" [Kubrakov y otros, 1985].

Se describen los tres métodos y se dan indicaciones para la utilización eficaz de cada uno de ellos.

El método de la multiplicación simplificada y el método log-normal incorporan los efectos de la variabilidad del emplazamiento, suponiendo que obedecen a una ley gaussiana y que se destinan a ser utilizados en ondas métricas y frecuencias superiores. El método de la suma cuadrática es válido para la recepción punto a punto y debe aplicarse sucesivamente con emplazamientos de receptor diferentes en los estudios sobre cobertura.

* Este Informe debe señalarse a la atención de las Comisiones de Estudio 1 y 11.