

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R P.533-12
(09/2013)

**Método de predicción de la calidad
de funcionamiento de circuitos que
funcionan en ondas decamétricas**

Serie P
Propagación de las ondas radioeléctricas



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en el Anexo 1 a la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2014

© UIT 2014

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R P.533-12

Método de predicción de la calidad de funcionamiento de circuitos que funcionan en ondas decamétricas*

(1978-1982-1990-1992-1994-1995-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013)

Cometido

En esta Recomendación se presenta un método de predicción de frecuencias disponibles, de niveles de la señal y de la fiabilidad prevista para los sistemas con modulación analógica y digital en ondas decamétricas, teniendo en cuenta no sólo la relación señal/ruido sino también la dispersión del retardo temporal y de las frecuencias del canal.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las pruebas realizadas empleando el Banco de Datos D1 del UIT-R muestran que el método del Anexo 1 tiene una precisión comparable a la de los otros métodos más complejos;
- b) que se requiere información sobre las características de funcionamiento de las antenas de transmisión y de recepción para la aplicación práctica de este método¹;

recomienda

- 1 que se utilice la información contenida en el Anexo 1 en la predicción de la propagación de la onda ionosférica a frecuencias entre 2 y 30 MHz;
- 2 que las administraciones y el UIT-R procuren mejorar los métodos de predicción para incrementar la eficacia de las instalaciones de explotación y aumentar la precisión.

* En la parte de la dirección web del UIT-R dedicada a la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones puede obtenerse un programa informático (ITURHFProp) asociado con los procedimientos de predicción descritos en esta Recomendación.

¹ En la UIT puede obtenerse información detallada sobre toda una gama de antenas con un programa informático asociado; para más detalles, véase la Recomendación UIT-R BS.705.

Anexo 1

Índice

	<i>Página</i>
1	Introducción..... 4
	Parte 1 – Disponibilidad de frecuencias..... 4
2	Emplazamiento de los puntos de control..... 4
3	Máximas frecuencias utilizables básica y operacional (o de explotación)..... 4
3.1	Máximas frecuencias utilizables básicas 4
3.2	Frecuencia crítica de la capa E (foE)..... 4
3.3	MUF básica de la capa E 6
3.4	Características de la capa F2..... 6
3.5	MUF básica de la capa F2 6
3.5.1	Modo de orden mínimo 6
3.5.2	Modos de orden superior (trayectos superiores a 9 000 km) 7
3.6	Probabilidad de soporte de propagación ionosférica durante el mes..... 7
3.7	MUF operacional (o MUF de explotación) del trayecto 8
4	Frecuencia máxima de apantallamiento por la capa E (f_s)..... 8
	Parte 2 – Valor mediano de la intensidad de campo de la onda ionosférica..... 9
5	Valor mediano de la intensidad de campo de la onda ionosférica..... 9
5.1	Ángulo de elevación 9
5.2	Trayectos de hasta 7 000 km 11
5.2.1	Modos considerados..... 11
5.2.2	Determinación de la intensidad de campo 11
5.3	Trayectos superiores a 9 000 km 17
5.3.1	Determinación de la f_M 18
5.3.2	Determinación de la f_L 19
5.3.3	Estimación de la intensidad de campo E_H 21
5.4	Trayectos comprendidos entre 7 000 y 9 000 km..... 22
6	Valor mediano de la potencia disponible en el receptor..... 22

	<i>Página</i>
Parte 3 – Predicción de la calidad de funcionamiento del sistema	23
7 Valor mediano mensual de la relación señal/ruido (S/N)	23
8 Intensidad de campo de la onda ionosférica, potencia de la señal disponible recibida y relaciones S/N correspondientes a otros porcentajes de tiempo	23
9 Mínima frecuencia utilizable (LUF).....	24
10 Fiabilidad básica del circuito (BCR)	24
10.1 Fiabilidad de los sistemas con modulación analógica	24
10.2 Fiabilidad de los sistemas con modulación digital, considerando la dispersión del retardo temporal y de frecuencia de la señal recibida.....	24
10.2.1 Parámetros del sistema.....	24
10.2.2 Retardo de tiempo	25
10.2.3 Procedimiento de predicción de la fiabilidad.....	25
10.3 Dispersión en las regiones ecuatoriales	26
Apéndice 1 al Anexo 1 – Modelo de dispersión de las señales decamétricas en las regiones ecuatoriales.....	27

1 Introducción

Este procedimiento de predicción aplica un análisis del trayecto del rayo para trayectos de hasta 7 000 km, formulaciones empíricas de modos compuestos a partir del ajuste a los datos medidos para trayectos superiores a 9 000 km, y una transición suave entre estos dos métodos para trayectos de 7 000 a 9 000 km.

Se determina el valor mediano mensual de la MUF básica, la intensidad de campo incidente de la onda ionosférica y la potencia disponible en el receptor con una antena receptora sin pérdidas de ganancia determinada. El método incluye la estimación de los parámetros de la función de transferencia del canal que se pueden emplear para predecir la calidad de funcionamiento de los sistemas digitales. Se proponen métodos para la evaluación de la fiabilidad del circuito. Las intensidades de señal se normalizan respecto a los valores del banco de datos de mediciones del UIT-R. El método exige la determinación de una serie de características ionosféricas y parámetros de propagación en «puntos de control» especificados.

En las regiones ecuatoriales, y en particular por la tarde/noche (hora local), es posible que se distorsionen los resultados previstos a causa de inestabilidades estructurales ionosféricas regionales que no se tienen en cuenta en este método.

PARTE 1

Disponibilidad de frecuencias

2 Emplazamiento de los puntos de control

Se supone que la propagación se efectúa por el trayecto de círculo máximo entre el transmisor y el receptor en los modos E (trayectos de hasta 4 000 km) y en los modos F2 (todas las longitudes). Los puntos de control se seleccionan como se indica en el Cuadro 1, en función de la longitud del trayecto y la capa de reflexión.

3 Máximas frecuencias utilizables básica y operacional (o de explotación)

La estimación de la MUF operacional (o MUF de explotación) (frecuencia más elevada que permite una explotación aceptable de un servicio de radiocomunicación) se hace en dos etapas; en primer lugar se estima la MUF básica a partir de una serie de parámetros ionosféricos; en segundo lugar se determina un factor de corrección para tener en cuenta los mecanismos de propagación a frecuencias superiores a la MUF básica.

3.1 Máximas frecuencias utilizables básicas

Se evalúan las MUF básicas de los diversos modos de propagación en términos de las correspondientes frecuencias críticas de la capa ionosférica y de un factor relacionado con la longitud del salto. Cuando se consideran los modos E y F2, la mayor de las dos MUF básicas de los modos E y F2 de orden mínimo representa la MUF básica del trayecto.

3.2 Frecuencia crítica de la capa E (foE)

El valor mediano mensual de la frecuencia foE se determina como se indica en la Recomendación UIT-R P.1239.

CUADRO 1

Emplazamiento de los puntos de control para la determinación de la MUF básica, el apantallamiento por la capa E, las alturas de reflexión especular del trayecto del rayo y la absorción ionosférica

a) MUF básica y girofrecuencia de los electrones asociada

Longitud del trayecto, D (km)	Modos E	Modos F2
$0 < D \leq 2\,000$	M	M
$2\,000 < D \leq 4\,000$	$T + 1\,000, R - 1\,000$	–
$2\,000 < D \leq d_{m\acute{a}x}$	–	M
$D > d_{m\acute{a}x}$	–	$T + d_0 / 2, R - d_0 / 2$

b) Apantallamiento por la capa E

Longitud del trayecto, D (km)	Modos F2
$0 < D \leq 2\,000$	M
$2\,000 < D < 9\,000$	$T + 1\,000, R - 1\,000$

c) Alturas de reflexión especular de los trayectos del rayo

Longitud del trayecto, D (km)	Modos F2
$0 < D \leq d_{m\acute{a}x}$	M
$d_{m\acute{a}x} < D < 9\,000$	$T + d_0 / 2, M, R - d_0 / 2$

d) Absorción ionosférica y girofrecuencia de los electrones asociada

Longitud del trayecto, D (km)	Modos E	Modos F2
$0 < D \leq 2\,000$	M	M
$2\,000 < D \leq 4\,000$	$T + 1\,000, M, R - 1\,000$	–
$2\,000 < D \leq d_{m\acute{a}x}$	–	$T + 1\,000, M, R - 1\,000$
$d_{m\acute{a}x} < D < 9\,000$	–	$T + 1\,000, T + d_0 / 2, M, R - d_0 / 2, R - 1\,000$

- M : punto intermedio del trayecto
- T : emplazamiento del transmisor
- R : emplazamiento del receptor
- $d_{m\acute{a}x}$: longitud máxima de un salto para el modo F2
- d_0 : longitud del salto del modo de orden inferior

Las distancias se expresan en km.

3.3 MUF básica de la capa E

La frecuencia foE se evalúa en los puntos de control indicados en el Cuadro 1a), y se selecciona el valor menor para los trayectos de 2 000 a 4 000 km. La MUF básica de un modo E de n saltos en un trayecto de longitud D viene dada por:

$$n E(D)MUF = foE \cdot \sec i_{110} \quad (1)$$

donde i_{110} es el ángulo de incidencia a una altura de reflexión especular de 110 km, en el punto medio de un salto de longitud $d = D/n$.

La MUF básica de la capa E de este trayecto es el valor de $E(D)MUF$ para el modo E de orden mínimo.

3.4 Características de la capa F2

Las representaciones numéricas de los valores medianos mensuales de las características ionosféricas de foF2 y M(3000)F2, para valores del índice solar $R_{12} = 0$ y 100, y para cada mes, se toman de la Recomendación UIT-R P.1239, donde el campo magnético se evalúa a una altura de 300 km. Estas representaciones se utilizan para determinar estos valores en las horas necesarias y en los puntos de control del Cuadro 1a). Se aplica una interpolación o extrapolación lineal para los valores predominantes del índice comprendidos entre $R_{12} = 0$ y 160 (véase la Recomendación UIT-R P.371). En el caso de foF2 únicamente, y para una actividad solar más elevada, R_{12} se hace igual a 160.

3.5 MUF básica de la capa F2

3.5.1 Modo de orden mínimo

3.5.1.1 Trayectos de hasta d_{max} (km)

El modo de orden mínimo, n_0 , viene determinado por consideraciones geométricas, utilizando la altura de reflexión especular h_r obtenida en el punto de control en el punto medio del trayecto mediante la ecuación:

$$h_r = \frac{1490}{M(3000)F2} - 176 \text{ km o } 500 \text{ km, tomándose entre ambos el valor que sea menor} \quad (2)$$

Para el modo de n -ésimo orden, la MUF básica de la capa F2 se calcula de la manera siguiente:

$$n_0 F2(D)MUF = \left[1 + \left(\frac{C_d}{C_{3000}} \right) (B - 1) \right] \cdot foF2 + \frac{f_H}{2} \left(1 - \frac{d}{d_{m\acute{a}x}} \right) \quad (3)$$

donde:

f_H : valor de la girofrecuencia de los electrones, para una altura de 300 km, determinado en cada uno de los puntos de control del Cuadro 1a)

$$C_d = 0,74 - 0,591 Z - 0,424 Z^2 - 0,090 Z^3 + 0,088 Z^4 + 0,181 Z^5 + 0,096 Z^6 \quad (4)$$

con $Z = 1 - 2d/d_{m\acute{a}x}$

$$d_{m\acute{a}x} = 4\,780 + (12\,610 + 2\,140/x^2 - 49\,720/x^4 + 688\,900/x^6) (1/B - 0,303) \quad (5)$$

$$B = M(3000)F2 - 0,124 + \left[[M(3000)F2]^2 - 4 \right] \cdot \left[0,0215 + 0,005 \operatorname{sen} \left(\frac{7,854}{x} - 1,9635 \right) \right] \quad (6)$$

donde:

- $d = D/n_0$ y $d_{m\acute{a}x}$ se expresan en kil6metros
 C_{3000} : valor de C_d para $d = 3\ 000$ km
 $x = f_oF2/f_oE$, o 2, tomándose entre ambos el valor que sea mayor
 f_oE se calcula como en el § 3.2.

$nF2(D)MUF$ para el modo de orden m6nimo, n_0 , es la MUF del trayecto b6sico. Para calcular la MUF b6sica $d_{m\acute{a}x}$ se restringe a un valor no superior a 4 000 km.

3.5.1.2 Trayectos superiores a $d_{m\acute{a}x}$ (km)

La MUF b6sica del modo de orden m6nimo n_0 $F2(D)MUF$ para una longitud de trayecto D se hace igual al menor de los valores de $F2(d_{m\acute{a}x})MUF$ determinados por la ecuaci6n (3) para los dos puntos de control del Cuadro 1a). Esta es tambi6n la MUF b6sica del trayecto.

3.5.2 Modos de orden superior (trayectos superiores a 9 000 km)

3.5.2.1 Trayectos de hasta $d_{m\acute{a}x}$ (km)

La MUF b6sica de la capa F2 para un modo de n saltos se calcula por las ecuaciones (3) a (6) en el punto de control situado en el punto medio del trayecto indicado en el Cuadro 1a) para un salto de longitud $d = D/n$.

3.5.2.2 Trayectos superiores a $d_{m\acute{a}x}$ (km)

La MUF b6sica de la capa F2 para un modo de n saltos se calcula en funci6n de $F2(d_{m\acute{a}x})MUF$ y de un factor de proporcionalidad de la distancia que depende de las longitudes respectivas de los saltos del modo en cuesti6n y del modo de menor orden posible. Para calcular M_n y M_{n_0} , se vuelve a determinar la m6xima distancia de salto, $d_{m\acute{a}x}$, en el punto de control, que puede ser mayor de 4 000 km.

$$n F2(D)MUF = n_0 F2(d_{m\acute{a}x})MUF \cdot M_n / M_{n_0} \quad (7)$$

donde M_n / M_{n_0} se obtiene de la ecuaci6n (3) como se indica a continuaci6n:

$$\frac{M_n}{M_{n_0}} = \frac{n F2(d)MUF}{n_0 F2(D)MUF} \quad (8)$$

Se selecciona al valor m6s bajo de los valores calculados en los dos puntos de control del Cuadro 1a).

3.6 Probabilidad de soporte de propagaci6n ionosf6rica durante el mes

En algunos casos bastar6 con predecir la probabilidad de disponer de suficiente ionizaci6n para soportar la propagaci6n por el trayecto, sin tener en cuenta las caracter6sticas del sistema y de la antena y los requisitos de calidad de funcionamiento. En esos casos, es necesario conocer la probabilidad de que la MUF supere la frecuencia de trabajo. En los § 3.3 y 3.5 se dan los valores intermedios de la MUF(50) correspondientes a la propagaci6n en los modos E y F2.

En el caso de los modos F2 el factor de decilo inferior, δ_i , entre la MUF superada durante el 90% de los d6as del mes, MUF(90) y la MUF(50), se deduce en la Recomendaci6n UIT-R P.1239, Cuadro 2, en funci6n de la hora local, la latitud, la estaci6n y el n6mero de manchas solares.

Cuando la frecuencia de funcionamiento, f , es menor que la MUF(50), la probabilidad de soporte ionosférico se expresa mediante:

$$F_{prob} = 130 - \frac{80}{1 + \text{MUF}(50)/(f \cdot \delta_l)} \quad \delta = 100, \text{ tomándose entre ambos el valor que sea menor} \quad (9)$$

El factor de decilo superior, δ_u , entre la MUF superada durante el 10% de los días del mes, MUF(10) y la MUF(50), se deduce en la Recomendación UIT-R P.1239, Cuadro 3, en función de la hora local, la latitud, la estación y el número de manchas solares.

Cuando la frecuencia de trabajo, f , es mayor que la MUF(50), la probabilidad de soporte ionosférico se expresa mediante:

$$F_{prob} = \frac{80}{1 + f/(\text{MUF}(50) \cdot \delta_u)} - 30 \quad \delta = 0, \text{ tomándose entre ambos el valor que sea mayor} \quad (10)$$

En el caso de los modos E los valores pertinentes para los factores interdecilos son 1,05 y 0,95, respectivamente.

La distribución de la MUF operacional a una hora determinada de un mes dado puede obtenerse aplicando la distribución que se describe en el § 3.6.

Obsérvese que las MUF operacionales superadas durante el 90% y el 10% de los días del mes se definen como la frecuencia de funcionamiento óptima y la frecuencia probable más elevada, respectivamente.

3.7 MUF operacional (o MUF de explotación) del trayecto

La MUF de explotación del trayecto es la mayor de las MUF de explotación para los modos F2 y de las MUF de explotación para los modos E. La relación entre las MUF de explotación y básica dependerán de las características de los sistemas y de las antenas, de la longitud geográfica del trayecto y de otras consideraciones, y debe determinarse a partir de la experiencia práctica relativa a la calidad de funcionamiento del circuito. Cuando no se disponga de dicha experiencia para los modos F2, la MUF de explotación es igual al producto de la MUF básica por R_{op} donde R_{op} se indica en el Cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.1240; para los modos de la capa E la MUF de explotación es igual a la MUF básica.

La estimación de la MUF de explotación superada durante el 10% y el 90% de los días se determina multiplicando el valor mediano de la MUF de explotación por los factores apropiados de los Cuadros 2 y 3 de la Recomendación UIT-R P.1239, en el caso de los modos F. En el caso de los modos E, los factores apropiados son 1,05 y 0,95, respectivamente.

4 Frecuencia máxima de apantallamiento por la capa E (f_s)

Para trayectos de hasta 4 000 km (véase el Cuadro 1b)) se considera el apantallamiento por la capa E de los modos F2. Para calcular la frecuencia máxima de apantallamiento se toma el valor de foE en el punto medio del trayecto (para trayectos de hasta 2 000 km) o el mayor de los valores de foE en los dos puntos de control situados a 1 000 km de cada extremo del trayecto (para trayectos superiores a 2 000 km).

$$f_s = 1,05 \text{ foE sec } i \quad (11)$$

siendo:

$$i = \arcsen \left(\frac{R_0 \cos \Delta_F}{R_0 + h_r} \right) \quad (12)$$

donde:

- i : ángulo de incidencia a la altura $h_r = 110$ km
- R_0 : radio de la Tierra = 6 371 km
- Δ_F : ángulo de elevación para el modo de la capa F2 (determinado por la ecuación (13)).

PARTE 2

Valor mediano de la intensidad de campo de la onda ionosférica

5 Valor mediano de la intensidad de campo de la onda ionosférica

El valor previsto de la intensidad de campo es la mediana mensual de todos los días del mes. El procedimiento de predicción consta de tres partes que dependen de la longitud del trayecto. Para longitudes del trayecto inferiores a 7 000 km las predicciones del valor mediano de la intensidad de campo de la onda ionosférica se realizan utilizando únicamente el método descrito en el § 5.2. Para longitudes del trayecto superiores a 9 000 km estas predicciones se hacen empleando sólo el método del § 5.3. Para longitudes del trayecto entre 7 000 y 9 000 km se usan ambos métodos y los resultados se interpolan mediante el método indicado en el § 5.4.

5.1 Ángulo de elevación

El ángulo de elevación que se aplica a todas las frecuencias, incluidas las superiores a la MUF básica, viene dado por:

$$\Delta = \arctg \left(\cotg \frac{d}{2 R_0} - \frac{R_0}{R_0 + h_r} \operatorname{cosec} \frac{d}{2 R_0} \right) \quad (13)$$

donde:

- d : longitud del salto de un modo de n saltos, dada por $d = D/n$
- h_r : altura equivalente de reflexión en un plano especular
para los modos E, $h_r = 110$ km
para los modos F2, h_r se determina en función del tiempo, el emplazamiento y la longitud del salto.

La altura de reflexión especular, h_r , para los modos F2 se calcula como se indica a continuación, siendo:

$$x = f_oF2/f_oE \quad \text{y} \quad H = \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 316$$

con:

$$\Delta M = \frac{0,18}{y - 1,4} + \frac{0,096(R_{12} - 25)}{150}$$

e $y = x$ o 1,8, tomándose entre ambos el valor que sea mayor.

a) Para $x > 3,33$ y $x_r = f/foF2 \geq 1$, donde f es la frecuencia de la onda, se tiene:

$$h_r = h \text{ u } 800 \text{ km, tomándose entre ambos el valor que sea menor} \quad (14)$$

donde:

$$\begin{aligned} h &= A_1 + B_1 2,4^{-a} && \text{para } B_1 \text{ y } a \geq 0 \\ &= A_1 + B_1 && \text{en los demás casos} \end{aligned}$$

con:

$$\begin{aligned} A_1 &= 140 + (H - 47) E_1 \\ B_1 &= 150 + (H - 17) F_1 - A_1 \\ E_1 &= -0,09707 x_r^3 + 0,6870 x_r^2 - 0,7506 x_r + 0,6 \end{aligned}$$

F_1 es tal que:

$$\begin{aligned} F_1 &= -1,862 x_r^4 + 12,95 x_r^3 - 32,03 x_r^2 + 33,50 x_r - 10,91 && \text{para } x_r \leq 1,71 \\ F_1 &= 1,21 + 0,2 x_r && \text{para } x_r > 1,71 \end{aligned}$$

y a varía en función de la distancia d y de la distancia de salto d_s de acuerdo con:

$$a = (d - d_s) / (H + 140)$$

donde:

$$\begin{aligned} d_s &= 160 + (H + 43) G \\ G &= -2,102 x_r^4 + 19,50 x_r^3 - 63,15 x_r^2 + 90,47 x_r - 44,73 && \text{para } x_r \leq 3,7 \\ G &= 19,25 && \text{para } x_r > 3,7 \end{aligned}$$

b) Para $x > 3,33$ y $x_r < 1$ se tiene:

$$h_r = h \text{ u } 800 \text{ km, tomándose entre ambos el valor que sea menor} \quad (15)$$

donde:

$$\begin{aligned} h &= A_2 + B_2 b && \text{para } B_2 \geq 0 \\ &= A_2 + B_2 && \text{en los demás casos} \end{aligned}$$

con:

$$\begin{aligned} A_2 &= 151 + (H - 47) E_2 \\ B_2 &= 141 + (H - 24) F_2 - A_2 \\ E_2 &= 0,1906 Z^2 + 0,00583 Z + 0,1936 \\ F_2 &= 0,645 Z^2 + 0,883 Z + 0,162 \end{aligned}$$

donde:

$Z = x_r$ o 0,1, tomándose entre ambos el valor que sea mayor, y b varía en función de la distancia normalizada d_f , y de Z y H de acuerdo con:

$$b = -7,535 d_f^4 + 15,75 d_f^3 - 8,834 d_f^2 - 0,378 d_f + 1$$

donde:

$$d_f = \frac{0,115 d}{Z(H + 140)} \text{ ó } 0,65, \text{ tomándose entre ambos el valor que sea menor}$$

c) Para $x \leq 3,33$ se tiene:

$$h_r = 115 + HJ + Ud \text{ u } 800 \text{ km, tomándose entre ambos el valor que sea menor} \quad (16)$$

con:

$$J = -0,7126 y^3 + 5,863 y^2 - 16,13 y + 16,07$$

y:

$$U = 8 \times 10^{-5} (H - 80) (1 + 11 y^{-2,2}) + 1,2 \times 10^{-3} H y^{-3,6}$$

En los trayectos de hasta $d_{m\acute{a}x}$ (km) h_r se evalúa en el punto medio del trayecto; en los trayectos más largos se determina en todos los puntos de control indicados en el Cuadro 1c), y se emplea su valor medio.

5.2 Trayectos de hasta 7 000 km

Para longitudes del trayecto inferiores a 7 000 km las predicciones del valor mediano de la intensidad de campo de la onda ionosférica se realizan utilizando únicamente el método descrito en el § 5.2. Para longitudes del trayecto entre 7 000 y 9 000 km se utilizan los métodos descritos en los §§ 5.2 y 5.3. A continuación se interpolan los resultados obtenidos por cada método mediante el método indicado en el § 5.4.

5.2.1 Modos considerados

Se seleccionan como máximo tres modos E (para trayectos de hasta 4 000 km) y seis modos F2 que cumplen todos los criterios siguientes:

- alturas de reflexión especular:
 - para los modos E, a partir de una altura $h_r = 110$ km
 - para los modos F2, a partir de una altura h_r que se determina de la ecuación (2), donde M(3 000)F2 se evalúa en el punto medio del trayecto (trayectos de hasta $d_{m\acute{a}x}$ (km)), o en el punto de control indicado en el Cuadro 1c) donde foF2 tiene el valor más bajo (trayectos entre $d_{m\acute{a}x}$ y 9 000 km);
- modos E – modo de orden más bajo con una longitud de salto de hasta 2 000 km, y los dos siguientes modos de orden más elevado;
- modos F2 – modo de orden más bajo con una longitud de salto de hasta $d_{m\acute{a}x}$ (km) y los cinco siguientes modos de orden más elevado con una frecuencia máxima de apantallamiento por la capa E, que se evalúa como se indica en § 4, y que es inferior a la frecuencia de funcionamiento.

5.2.2 Determinación de la intensidad de campo

Para cada modo w seleccionado en el § 5.2.1, la intensidad de campo mediana viene dada por:

$$E_{tw} = 136,6 + P_t + G_t + 20 \log f - L_b \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (17)$$

donde:

- f : frecuencia de transmisión (MHz)
- P_t : potencia del transmisor (dB(1 kW))

G_t : ganancia de la antena transmisora en los ángulos de acimut y de elevación (Δ) requeridos, con relación a una antena isótropa (dB)

L_b : pérdida de transmisión básica del trayecto del rayo para el modo considerado, dada por:

$$L_b = 32,45 + 20 \log f + 20 \log p' + L_i + L_m + L_g + L_h + L_z \quad (18)$$

siendo:

p' : distancia oblicua virtual (km)

$$p' = 2R_0 \sum_1^n \left[\frac{\text{sen}(d/2R_0)}{\cos[\Delta + (d/2R_0)]} \right] \quad (19)$$

L_i : pérdida por absorción (dB) para un modo de n saltos, dada por:

$$L_i = \frac{n(1 + 0,0067R_{12}) \cdot \sec i}{(f + f_L)^2} \cdot \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k AT_{\text{mediodía}} \cdot \frac{F(\chi_j)}{F(\chi_{j\text{mediodía}})} \cdot \Phi_n \left(\frac{f_v}{foE} \right) \quad (20)$$

con:

$$F(\chi) = \cos^p (0,881 \chi) \text{ ó } 0,02, \text{ tomándose entre ambos el valor que sea mayor} \quad (21)$$

donde:

$$f_v = f \cos i \quad (22)$$

e

i : ángulo de incidencia a 110 km

k : número de puntos de control (según el Cuadro 1d)

f_L : media de los valores de la girofrecuencia de los electrones alrededor del componente longitudinal del campo magnético de la Tierra para una altura de 100 km, determinada en los puntos de control dados en el Cuadro 1d). Para la inclinación magnética, I , esta cantidad puede calcularse como:

$$f_L = |f_H \cdot \text{sen}(I)| \quad (23)$$

χ_j : ángulo cenital solar del j -ésimo punto de control o 102° , tomándose entre ambos el valor que sea menor. En el cálculo de este parámetro se emplea la ecuación de tiempo correspondiente a la mitad del mes de que se trata

$\chi_{j\text{mediodía}}$: valor de χ_j en el mediodía local

$AT_{\text{mediodía}}$: factor de absorción en el mediodía local y $R_{12} = 0$ dado como función de la latitud geográfica y del mes en la Fig. 1

$\Phi_n \left(\frac{f_v}{foE} \right)$: factor de penetración de la capa absorción dado como función de la relación de la frecuencia de la onda de incidencia vertical equivalente f_v a foE conforme a la Fig. 2

p : exponente de absorción diurna dado en función de la inclinación magnética modificada calculada a la altura de 100 km (véase el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R P.1239) y el mes en la Fig. 3.

En frecuencias superiores a la MUF básica, la absorción sigue variando con la frecuencia, y se calcula suponiendo que los trayectos del rayo son los mismos que los de la MUF básica.

L_m : pérdidas «por encima de la MUF»:

Para frecuencias f iguales o inferiores a la MUF básica (f_b) de un modo dado:

$$L_m = 0 \quad (24)$$

Para los modos E y para $f > f_b$:

$$L_m = 130 [(f / f_b) - 1]^2 \quad \text{dB} \quad (25)$$

u 81 dB, tomándose entre ambos el valor que sea menor.

Para los modos F2 y para $f > f_b$:

$$L_m = 36 [(f / f_b) - 1]^{1/2} \quad \text{dB} \quad (26)$$

ó 62 dB, tomándose entre ambos el valor que sea menor.

L_g : pérdida acumulativa por reflexión en el suelo en los puntos de reflexión intermedios:

Para un modo de n saltos:

$$L_g = 2(n - 1) \quad \text{dB} \quad (27)$$

L_h : factor que tiene en cuenta las pérdidas aurales y de otro tipo indicadas en el Cuadro 2. Los valores se evalúan en función de la latitud geomagnética G_n (N o S del Ecuador) y la hora local t (para un dipolo geocéntrico con un polo situado a 78,5° N y 68,2° W: se toman los valores medios en los puntos de control del Cuadro 1d)).

En el Hemisferio Norte, el invierno abarca los meses de diciembre a febrero; los equinoccios, los de marzo a mayo y de septiembre a noviembre; y el verano, los de junio a agosto. En el Hemisferio Sur se invierten los meses correspondientes al invierno y el verano.

Para $G_n < 42,5^\circ$, $L_h = 0$ dB

L_z : término que refleja los efectos de propagación ionosférica no incluidos por otro concepto en el presente método. El valor recomendado actual es 10,3 dB dado en el § 5.2.

NOTA 1 – Obsérvese que el valor de L_z depende de los elementos del método de predicción, en consecuencia cualquier cambio en esos elementos exige una revisión del valor de L_z .

Prescindiendo de los modos apantallados por la capa E, se toma como valor mediano equivalente resultante total de la intensidad de campo de la onda ionosférica, E_s , el valor cuadrático de la intensidad de campo para N modos, seleccionando N para que abarque los modos F2 y E para los que se hayan realizado predicciones, es decir:

$$E_{ts} = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{E_{tw}/10} \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (28)$$

En la predicción de la calidad de funcionamiento de los sistemas con modulación digital, se tiene en cuenta el valor mediano equivalente de la intensidad de campo de la onda ionosférica de cada uno de los modos; véase § 10.2.

FIGURA 1
Factor de absorción, $A_{T_{mediodía}}$

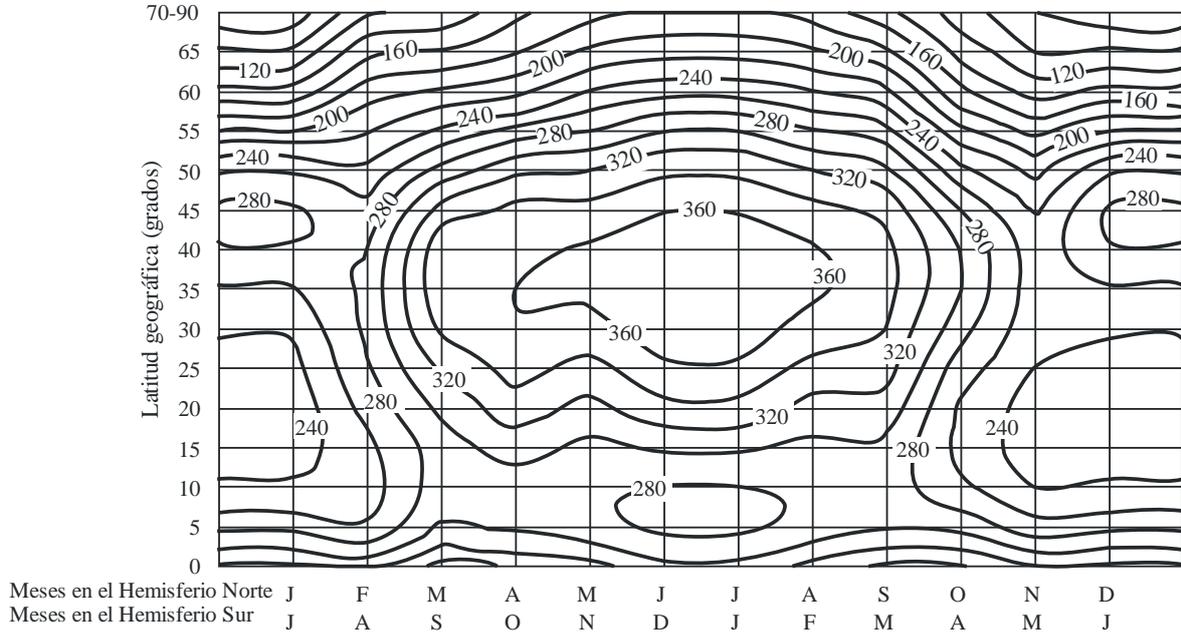
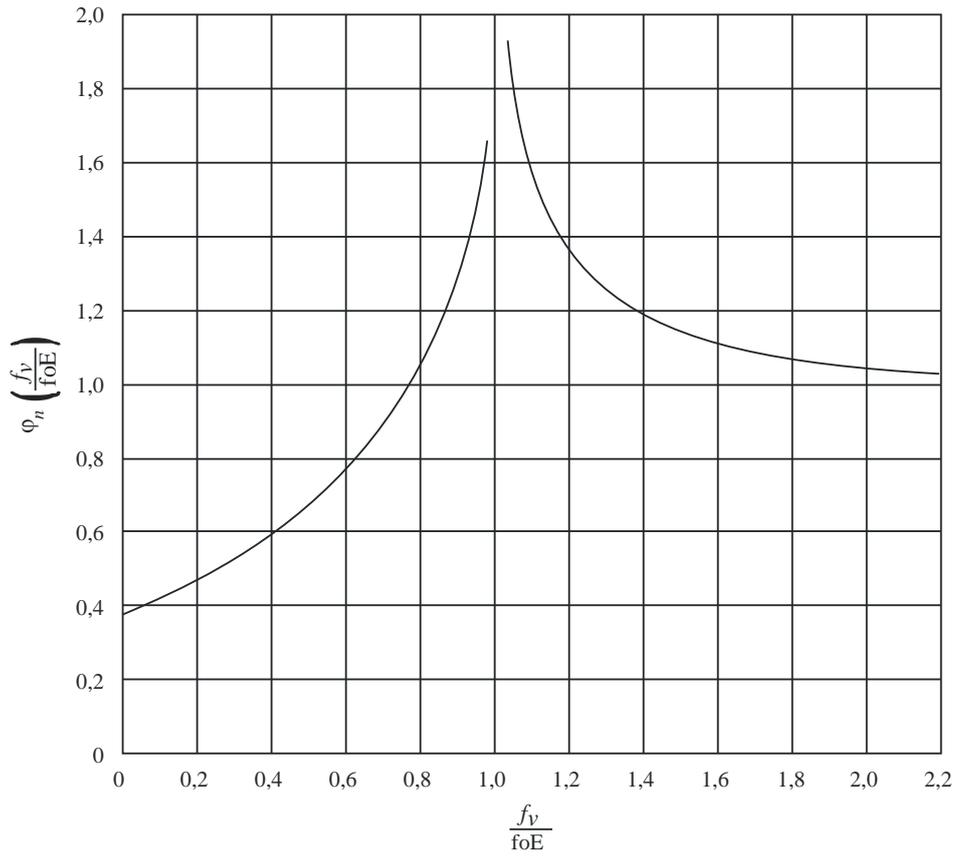


FIGURA 2

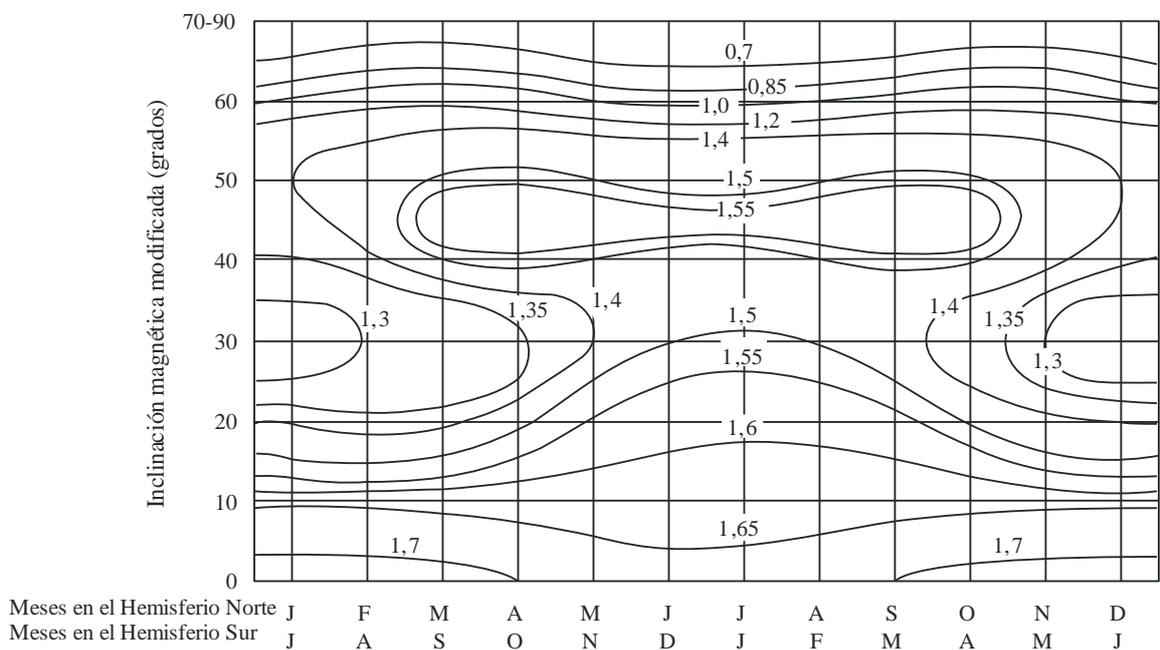
Factor de penetración de la capa de absorción, $\varphi_n \left(\frac{f_y}{foE} \right)$



P0533-02

FIGURA 3

Exponente de absorción diurna, p



P0533-03

CUADRO 2

Valores de L_h que dan las atenuaciones aurorales y de otro tipo (dB)

G_n	a) Distancias de transmisión inferiores o iguales a 2 500 km								
	Hora local en el punto medio del trayecto, t								
	$01 \leq t < 04$	$04 \leq t < 07$	$07 \leq t < 10$	$10 \leq t < 13$	$13 \leq t < 16$	$16 \leq t < 19$	$19 \leq t < 22$	$22 \leq t < 01$	
$77,5^\circ \leq G_n$	2,0	6,6	6,2	1,5	0,5	1,4	1,5	1,0	I n v i e r n o
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	3,4	8,3	8,6	0,9	0,5	2,5	3,0	3,0	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	6,2	15,6	12,8	2,3	1,5	4,6	7,0	5,0	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	7,0	16,0	14,0	3,6	2,0	6,8	9,8	6,6	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	2,0	4,5	6,6	1,4	0,8	2,7	3,0	2,0	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	1,3	1,0	3,2	0,3	0,4	1,8	2,3	0,9	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	0,9	0,6	2,2	0,2	0,2	1,2	1,5	0,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,4	0,3	1,1	0,1	0,1	0,6	0,7	0,3	
$77,5^\circ \leq G_n$	1,4	2,5	7,4	3,8	1,0	2,4	2,4	3,3	E q u i n o c c i o
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	3,3	11,0	11,6	5,1	2,6	4,0	6,0	7,0	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	6,5	12,0	21,4	8,5	4,8	6,0	10,0	13,7	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	6,7	11,2	17,0	9,0	7,2	9,0	10,9	15,0	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	2,4	4,4	7,5	5,0	2,6	4,8	5,5	6,1	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	1,7	2,0	5,0	3,0	2,2	4,0	3,0	4,0	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	1,1	1,3	3,3	2,0	1,4	2,6	2,0	2,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,5	0,6	1,6	1,0	0,7	1,3	1,0	1,3	
$77,5^\circ \leq G_n$	2,2	2,7	1,2	2,3	2,2	3,8	4,2	3,8	V e r a n o
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	2,4	3,0	2,8	3,0	2,7	4,2	4,8	4,5	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	4,9	4,2	6,2	4,5	3,8	5,4	7,7	7,2	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	6,5	4,8	9,0	6,0	4,8	9,1	9,5	8,9	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	3,2	2,7	4,0	3,0	3,0	6,5	6,7	5,0	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	2,5	1,8	2,4	2,3	2,6	5,0	4,6	4,0	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	1,6	1,2	1,6	1,5	1,7	3,3	3,1	2,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,8	0,6	0,8	0,7	0,8	1,6	1,5	1,3	

CUADRO 2 (fin)

G_n	b) Distancias de transmisión superiores a 2 500 km								
	Hora local en el punto medio del trayecto, t								
	$01 \leq t < 04$	$04 \leq t < 07$	$07 \leq t < 10$	$10 \leq t < 13$	$13 \leq t < 16$	$16 \leq t < 19$	$19 \leq t < 22$	$22 \leq t < 01$	
$77,5^\circ \leq G_n$	1,5	2,7	2,5	0,8	0,0	0,9	0,8	1,6	I n v i e r n o
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	2,5	4,5	4,3	0,8	0,3	1,6	2,0	4,8	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	5,5	5,0	7,0	1,9	0,5	3,0	4,5	9,6	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	5,3	7,0	5,9	2,0	0,7	4,0	4,5	10,0	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	1,6	2,4	2,7	0,6	0,4	1,7	1,8	3,5	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	0,9	1,0	1,3	0,1	0,1	1,0	1,5	1,4	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	0,6	0,6	0,8	0,1	0,1	0,6	1,0	0,5	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,3	0,3	0,4	0,0	0,0	0,3	0,5	0,4	
$77,5^\circ \leq G_n$	1,0	1,2	2,7	3,0	0,6	2,0	2,3	1,6	E q u i n o c c i o
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	1,8	2,9	4,1	5,7	1,5	3,2	5,6	3,6	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	3,7	5,6	7,7	8,1	3,5	5,0	9,5	7,3	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	3,9	5,2	7,6	9,0	5,0	7,5	10,0	7,9	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	1,4	2,0	3,2	3,8	1,8	4,0	5,4	3,4	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	0,9	0,9	1,8	2,0	1,3	3,1	2,7	2,0	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	0,6	0,6	1,2	1,3	0,8	2,0	1,8	1,3	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,3	0,3	0,6	0,6	0,4	1,0	0,9	0,6	
$77,5^\circ \leq G_n$	1,9	3,8	2,2	1,1	2,1	1,2	2,3	2,4	V e r a n o
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	1,9	4,6	2,9	1,3	2,2	1,3	2,8	2,7	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	4,4	6,3	5,9	1,9	3,3	1,7	4,4	4,5	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	5,5	8,5	7,6	2,6	4,2	3,2	5,5	5,7	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	2,8	3,8	3,7	1,4	2,7	1,6	4,5	3,2	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	2,2	2,4	2,2	1,0	2,2	1,2	4,4	2,5	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	1,4	1,6	1,4	0,6	1,4	0,8	2,9	1,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,7	0,8	0,7	0,3	0,7	0,4	1,4	0,8	

5.3 Trayectos superiores a 7 000 km

Para longitudes del trayecto superiores a 9 000 km las predicciones del valor mediano de la intensidad de campo de la onda ionosférica se realizan utilizando únicamente el método descrito en el § 5.3. Para longitudes del trayecto comprendidas entre 7 000 y 9 000 km se emplean los dos métodos indicados en los §§ 5.2 y 5.3. A continuación los resultados obtenidos por cada método se interpolan mediante el método indicado en el § 5.4.

Para trayectos superiores a 7 000 km no es posible calcular todos los modos posibles. En consecuencia, se aplica el siguiente método donde la LUF (f_L) y la MUF (f_M) operacional definen la gama de frecuencias de transmisión. Los valores de f_M y f_L son los parámetros más importantes de la fórmula empírica para calcular la intensidad de campo. Sin embargo, para longitudes de trayecto entre

7 000 km y 9 000 km los resultados de ambos métodos se interpolan para lograr una transición gradual (véase el § 5.4).

Este método supone tres pasos básicos:

- determinación de la f_M ;
- determinación de la f_L ;
- estimación de la intensidad de campo.

5.3.1 Determinación de la f_M

Para determinar la f_M se hacen predicciones dividiendo el trayecto en el mínimo número (n_M) de saltos de igual longitud (d_M) de 4 000 km o menos. El ángulo de elevación se calcula de acuerdo a la ecuación (13), teniendo en cuenta la longitud del salto y una altura fija de 300 km. Si el ángulo de elevación es inferior a 3,0 grados, se añade un salto y se vuelven a calcular la longitud del salto y el ángulo de elevación hasta que este último rebase los 3,0 grados. A continuación se determinan mediante el Cuadro 1a) la posición de los dos puntos de control. En este caso, d_0 es igual a d_M de manera que los puntos de control están situados en la mitad de la longitud del salto ($d_M/2$) del transmisor al receptor.

En ambos puntos de control se determinan foF2, M(3000) y la girofrecuencia (f_H) de acuerdo con el § 3.4. Estos valores se emplean para calcular la F2(4000)MUF (f_4), la F2(Zero)MUF (f_z) y la MUF básica (f_{BM}) para los puntos de control:

$$f_{BM} = f_z + (f_4 - f_z)f_D \quad \text{MHz} \quad (29)$$

donde:

$$f_4 = 1.1 \cdot f_oF2 \cdot M(3000)F2$$

$$f_z = f_oF2 + \frac{f_H}{2}$$

El factor de reducción de la distancia (f_D) se utiliza para disminuir la MUF de 4 000 km a la longitud real del salto. El factor f_D varía entre 0,0 (para una longitud del salto de 0 km) y 1,0 (para una longitud del salto de 4 000 km).

$$f_D = \left(\left(\left(\left(\left(C_6 d_M + C_5 \right) d_M + C_4 \right) d_M + C_3 \right) d_M + C_2 \right) d_M + C_1 \right) d_M + C_0 \quad (30)$$

donde:

$$C_6: -2,40074637494790 \cdot 10^{-24}$$

$$C_5: 25,8520201885984 \cdot 10^{-21}$$

$$C_4: -92,4986988833091 \cdot 10^{-18}$$

$$C_3: 102,342990689362 \cdot 10^{-15}$$

$$C_2: 22,0776941764705 \cdot 10^{-12}$$

$$C_1: 87,4376851991085 \cdot 10^{-9}$$

$$C_0: 29,1996868566837 \cdot 10^{-6}$$

d_M : longitud del salto (km).

El valor f_{BM} se determina por separado para los dos puntos de control y se toma el menor valor como la MUF básica para todo el trayecto.

El valor de f_M se determina por separado para los dos puntos de control como el producto del factor K y la MUF básica. Se toma el menor valor como la MUF operacional para todo el trayecto.

$$f_M = K \cdot f_{BM} \quad \text{MHz} \quad (31)$$

El factor K se usa para calcular la MUF operacional, $f_{M,a}$ a partir de la MUF básica, f_{BM} :

$$K = 1,2 + W \frac{f_{BM}}{f_{BM,mediodía}} + X \left[\sqrt[3]{\frac{f_{BM,mediodía}}{f_{BM}}} - 1 \right] + Y \left[\frac{f_{BM,min}}{f_{BM,mediodía}} \right]^2 \quad (32)$$

siendo:

$f_{BM,mediodía}$: el valor de f_{BM} en un instante correspondiente al mediodía local;

$f_{BM,min}$: el menor valor de f_{BM} que se produce durante 24 horas.

W , X e Y aparecen en el Cuadro 3. El ángulo acimutal del trayecto de círculo máximo se determina en el centro del trayecto completo; este ángulo se emplea para interpolar linealmente el ángulo entre los valores Este-Oeste y Norte-Sur.

CUADRO 3

Valores de W , X e Y utilizados para determinar el factor de corrección K

	W	X	Y
Este-Oeste	0,1	1,2	0,6
Norte-Sur	0,2	0,2	0,4

5.3.2 Determinación de la f_L

La LUF viene fuertemente influenciada por la absorción no derivada. Las ondas decamétricas son absorbidas al penetrar en la capa D. Para determinar la LUF, el trayecto se divide en n_L saltos iguales de longitud d_L (ninguno de ellos mayor de 3 000 km) Los puntos de penetración se determinan suponiendo una altura de reflexión fija de 300 km y una altura de penetración de 90 km (dos puntos de penetración por salto).

La f_L se calcula mediante la ecuación (33):

$$f_L = \left(5.3 \left[\frac{(1+0.009R_{12}) \sum_1^m \cos^{0.5}(\chi)}{\cos(i_{90}) \log_e \left(\frac{9.5 \cdot 10^6}{p'} \right)} \right]^{0.5} - f_H \right) (A_w + 1) \quad \text{MHz} \quad (33)$$

siendo:

m : el número de puntos de penetración $2n_L$

R_{12} : el número de manchas solares que no saturan para valores elevados y pueden superar las 160

χ : el ángulo cenital solar que puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$\cos(\chi) = \sin(\varphi_m) \sin(\delta) + \cos(\varphi_m) \cos(\delta) \cos(\eta) \quad (34)$$

siendo:

δ : la declinación solar (radianes)

φ_m : la latitud geográfica de m-ésimo punto de penetración (radianes)

η : el ángulo horario solar (radianes).

La declinación solar, δ , puede aproximarse por la latitud subsolar en medio del mes (s_x) con arreglo al Cuadro 4:

CUADRO 4

Latitud subsolar en medio del mes

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
s_x (grados)	-21,2	-12,7	-2,2	9,7	18,8	23,3	21,6	14,1	3,1	-8,4	-18,4	-23,3

El ángulo horario solar puede aproximarse mediante la siguiente ecuación:

$$\eta \cong \left(\frac{UTC}{12} - 1 \right) \cdot \pi + y_m \quad (35)$$

siendo:

UTC : el tiempo universal (horas)

y_m : la longitud geográfica del m-ésimo punto de penetración (radianes).

En el sumatorio, χ se determina para cada paso del trayecto del rayo a través de la altura de 90 km.

Cuando $\chi > 90^\circ$, $\cos^{0.5}\chi$ se fija a cero

i_{90} : ángulo de incidencia a una altura de 90 km

p' : longitud del trayecto oblicuo

A_w : factor de anomalía invernal determinado en el punto medio del trayecto, que es la unidad para latitudes geográficas de 0° a 30° y a 90° , y alcanza los máximos valores indicados en el Cuadro 5 a 60° . Los valores para latitudes intermedias se calculan mediante interpolación lineal.

CUADRO 5

Valores del factor de anomalía invernal A_w , a una latitud geográfica de 60° utilizados en la ecuación para f_L

Hemisferio	Mes											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Norte	0,30	0,15	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,15	0,30
Sur	0,00	0,00	0,00	0,03	0,15	0,30	0,30	0,15	0,03	0,00	0,00	0,00

Inicialmente, la f_L para 24 horas se determina a partir de la ecuación (33) o de la LUF nocturna. La LUF nocturna (f_{LN}) se calcula como sigue:

$$f_{LN} = \sqrt{\frac{D}{3000}} \quad (36)$$

Para cada hora el mayor de los valores calculados mediante las ecuaciones (32) y (35) se toma como la f_L para esa hora. De esta forma, el mínimo valor de f_L para 24 horas es f_{LN} . A continuación, se determina la disminución de la LUF diurna a la LUF nocturna. Ello se debe a que la absorción no sigue exactamente el ángulo cenital del sol y presenta un retardo en torno al ocaso. Es necesario aplicar el siguiente procedimiento para determinar la relación entre la LUF diurna y la LUF nocturna.

La hora de LUF diurna a LUF nocturna (t_r) se define como la hora en la que la f_L actual es inferior a $2 * f_{LN}$ mientras que en la hora precedente f_L es superior a $2 * f_{LN}$. Si t_r existe, f_L debe calcularse de nuevo para las horas t_r y las tres siguientes horas. Si t_r no existe, la determinación de f_L para 24 horas está completa.

Cuando t_r existe, la f_L para dicha hora y las tres siguientes horas debe volverse a calcular de la forma siguiente. Para la hora (t_r), f_L se calcula utilizando:

$$f_L(t_r) = e^{-0,23} \cdot f_L(t_r - 1) \cdot (dt \cdot (1 - e^{-0,23}) + e^{-0,23}) \quad (37)$$

donde:

$$dt = \frac{2 \cdot f_{LN} - f_L(t_r)}{f_L(t_r - 1) - f_L(t_r)}$$

Para las tres siguientes horas ($n = 1, 2$ y 3), f_L se calcula como sigue:

$$f_L(t_r + n) = f_L(t_r + n - 1) \cdot e^{-0,23} \quad (38)$$

Los valores de f_L nuevamente calculados sustituyen los valores de f_L iniciales sólo si son superiores. Una vez determinados todos los valores de f_L en un periodo de 24 horas, se selecciona el actual valor de f_L y el cálculo de f_L queda completado.

5.3.3 Estimación de la intensidad de campo E_{tl}

La intensidad de campo mediana resultante, E_{tl} , viene dada por la fórmula:

$$E_{tl} = E_0 \left[1 - \frac{(f_M + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2 + (f_L + f_H)^2} \left[\frac{(f_L + f_H)^2}{(f + f_H)^2} + \frac{(f + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2} \right] \right] - 30,0 + P_t + G_{tl} + G_{ap} - L_y \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (39)$$

en la que E_0 es la intensidad de campo en el espacio libre para una p.i.r.e. de 3 MW. En este caso:

$$E_0 = 139,6 - 20 \log p' \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (40)$$

donde:

- p' se calcula por las ecuaciones (19) y (13) con $h_r = 300$ km
- G_{tl} : valor más alto de la ganancia de la antena de transmisión para el acimut requerido en la gama de elevación 0° a 8° (dB)
- G_{ap} : aumento de la intensidad de campo debido al enfoque (convergencia) a largas distancias, dado por:

$$G_{ap} = 10 \log \frac{D}{R_0 |\sin(D/R_0)|} \quad \text{dB} \quad (41)$$

Como el valor de G_{ap} dado por la fórmula anterior tiende a infinito cuando D es un múltiplo de πR_0 , su valor se limita a 15 dB.

- L_y : término con un concepto similar a L_z . El valor recomendado actual es $-0,9$ dB
Debe señalarse que el valor de L_y depende de los elementos del método de predicción, por lo que cualesquiera cambios en estos elementos deben ir acompañados idealmente por la revisión del valor de L_y
- f_H : media de los valores de la girofrecuencia de los electrones determinados en ambos puntos de control
- f_M : MUF (véase el § 5.3.1)
- f_L : LUF (see § 5.3.2).

5.4 Trayectos comprendidos entre 7 000 y 9 000 km

En esta gama de distancias, la intensidad de campo mediana de la onda ionosférica, E_{ii} , se determina por interpolación entre los valores de E_s y E_l . E_s es el valor resultante cuadrático de las intensidades de campo dado por la ecuación (28) y E_l se refiere a un modo mixto definido por la ecuación (39).

$$E_i = 100 \log_{10} X_i \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (42)$$

con:

$$X_i = X_s + \frac{D - 7\,000}{2\,000} (X_l - X_s)$$

donde:

$$X_s = 10^{0,01E_s}$$

y

$$X_l = 10^{0,01E_l}$$

La MUF básica del trayecto es igual al menor de los valores de la MUF básica dados por la ecuación (3) en los dos puntos de control indicados en el Cuadro 1a).

6 Valor mediano de la potencia disponible en el receptor

A distancias de hasta 7 000 km, para las cuales la intensidad de campo se calcula por el método del § 5.2, para un modo w determinado con una intensidad de campo de onda ionosférica, E_w (dB(1 μ V/m)), a una frecuencia, f (MHz), la potencia de señal disponible P_{rw} (dBW) procedente de una antena receptora exenta de pérdidas y con ganancia G_{rw} (dB con relación a un radiador isótropo) en la dirección de incidencia de la señal, es:

$$P_{rw} = E_w + G_{rw} - 20 \log_{10} f - 107,2 \quad \text{dBW} \quad (43)$$

El valor mediano de la potencia de señal disponible resultante P_r (dBW) viene dado por el sumatorio de las potencias originadas por los distintos modos; la contribución de cada modo depende de la ganancia de la antena receptora en la dirección de incidencia del modo. Para N modos que contribuyen al sumatorio se tiene:

$$P_r = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{P_{rw}/10} \quad \text{dBW} \quad (44)$$

A distancias superiores a 9 000 km, para las cuales la intensidad de campo se calcula por el método del § 5.3, la intensidad de campo, E_l , es la resultante de los modos compuestos. En este caso, P_r se determina mediante la ecuación (43), donde G_{rw} es el valor más grande de la ganancia de la antena receptora en el acimut considerado con un ángulo de elevación de 0° a 8° .

En la gama intermedia de 7 000 a 9 000 km, la potencia se determina mediante la ecuación (42) empleando las potencias correspondientes a E_s y E_l .

PARTE 3

Predicción de la calidad de funcionamiento del sistema

7 Valor mediano mensual de la relación señal/ruido (S/N)

En la Recomendación UIT-R P.372 se proporcionan valores medianos de la potencia de ruido atmosférico para la recepción con una antena monopolo vertical corta sin pérdidas encima de un suelo perfecto y también se indican las intensidades correspondientes de ruido artificial y ruido cósmico. El factor de ruido externo resultante se expresa mediante F_a (dB(kTb)) a la frecuencia f (MHz), donde k es la constante de Boltzmann y T una temperatura de referencia de 288 K. En general, cuando se utiliza otra antena de recepción práctica el factor de ruido resultante puede diferir de este valor de F_a . No obstante, como no se dispone de datos completos de medición del ruido para diferentes antenas, es apropiado suponer que se aplica el valor F_a que se obtuvo de la Recomendación UIT-R P.372, como una primera aproximación. Por consiguiente, mediana mensual de la relación señal/ruido (S/N) (dB) obtenida en una anchura de banda, b (Hz) es:

$$S/N = P_r - F_a - 10 \log_{10} b + 204 \quad (45)$$

donde:

P_r : es el valor mediano de la potencia disponible recibida que se calculó en el § 6.

8 Intensidad de campo de la onda ionosférica, potencia de la señal disponible recibida y relaciones S/N correspondientes a otros porcentajes de tiempo

La intensidad de campo de la onda ionosférica, la potencia disponible recibida y la relación señal/ruido se pueden determinar para un porcentaje de tiempo concreto en función de las desviaciones durante una hora y de un día a otro de las señales y del ruido. Si no se dispone de otros datos, los márgenes de desvanecimiento de la señal podrán ser los adoptados por la CAMR HFBC-87 con una desviación a corto plazo de 5 dB del decilo superior y 8 dB del decilo inferior. Para el desvanecimiento de la señal a largo plazo se toman las desviaciones de decilos en función de la relación entre la frecuencia de funcionamiento y la MUF básica del trayecto, según se indica en el Cuadro 2 de la Recomendación UIT-R P.842.

En el caso del ruido atmosférico, las desviaciones de los decilos de la potencia de ruido originadas por la variabilidad de un día a otro, se toman de la Recomendación UIT-R P.372. Actualmente no se aplica ningún margen para la variabilidad durante una hora. Para el ruido artificial, en ausencia de información directa sobre la variabilidad temporal, también se toman las desviaciones del decilo indicadas en la Recomendación UIT-R P.372, pese a que las mismas están estrictamente relacionadas con una combinación de variabilidad temporal y espacial.

La variabilidad de decilos durante una hora y de un día a otro combinada del ruido galáctico se considera igual a ± 2 dB.

La relación señal/ruido superada durante el 90% del tiempo está dada por:

$$S/N_{90} = S/N_{50} - (S_{wh}^2 + S_{dd}^2 + N_{dd}^2)^{1/2} \quad (46)$$

donde:

S_{wh} : desviación del decilo inferior de la señal deseada que se deduce del valor mediano por hora de la intensidad de campo resultante de los cambios durante una hora (dB)

- S_{dd} : desviación del decilo inferior de la señal deseada que se deduce del valor mediano mensual de la intensidad de campo resultante de los cambios de un día a otro (dB)
- N_{dd} : desviación del decilo superior del ruido de fondo que se deduce del valor mediano mensual de la intensidad de campo resultante de los cambios de un día a otro (dB).

En caso de otros porcentajes de tiempo las desviaciones podrán obtenerse de la información para una distribución log-normal que se describe en la Recomendación UIT-R P.1057.

9 Mínima frecuencia utilizable (LUF)

La LUF se define en la Recomendación UIT-R P.373. Según esta definición, la LUF es la frecuencia más baja, redondeada al 0,1 MHz más próximo, a la que la relación señal/ruido mediana mensual permite alcanzar el valor requerido de relación señal/ruido.

10 Fiabilidad básica del circuito (BCR)

10.1 Fiabilidad de los sistemas con modulación analógica

La BCR se define en la Recomendación UIT-R P.842, donde la fiabilidad representa la probabilidad (expresada en dicha Recomendación en forma de porcentaje) de que se alcance el criterio de calidad de funcionamiento especificado (es decir, la relación señal/ruido especificada). Para sistemas analógicos se evalúa sobre la base de las relaciones señal/ruido y teniendo en cuenta las variaciones del decilo durante una hora y de un día a otro de la intensidad de campo de la señal y del ruido de fondo. La distribución en torno al valor mediano se describe en el § 8. El procedimiento correspondiente se establece en la Recomendación UIT-R P.842.

10.2 Fiabilidad de los sistemas con modulación digital, considerando la dispersión del retardo temporal y de frecuencia de la señal recibida

En los sistemas con modulación robustos en cuanto a la dispersión del retardo temporal y la frecuencia prevista, la fiabilidad es igual al porcentaje de tiempo durante el cual se prevé que se cumplirá la relación señal/ruido requerida, utilizando el procedimiento que se describe en el § 8.

En general, en los sistemas con modulación digital, se debe tener en cuenta la dispersión del retardo temporal y la frecuencia de la señal recibida.

10.2.1 Parámetros del sistema

Se emplea una representación simplificada de la función de transferencia del canal. El cálculo de la fiabilidad para el método de modulación en cuestión se basa en cuatro parámetros:

- *Ventana de tiempo*, T_w : Intervalo de tiempo dentro del cual los modos de la señal contribuyen a la calidad de funcionamiento del sistema y fuera del cual provocan la reducción de dicha calidad.
- *Ventana de frecuencia*, F_w : Intervalo de frecuencia dentro del cual los modos de la señal contribuyen a la calidad de funcionamiento del sistema y fuera del cual provocan la reducción dicha calidad.
- *Relación señal/ruido requerida*, S/N_r : Relación entre la suma de las potencias del valor mediano por hora de los modos de la señal y el ruido, que se requiere para alcanzar la calidad de funcionamiento especificada cuando todos los modos de señal se encuentran dentro de las ventanas de tiempo y frecuencia, T_w y F_w .

- *Relación de amplitudes, A*: Para cada modo de propagación se predecirá el valor mediano por hora de la intensidad de campo, considerando la potencia del transmisor y la ganancia de la antena correspondientes a ese modo. Se determinará el modo más intenso de propagación durante esa hora y la relación de amplitudes, A , será igual a la relación entre la intensidad del modo dominante y la de un modo subdominante, que sólo afectará a la calidad de funcionamiento del sistema si llega con un retardo de tiempo superior a T_w o una dispersión de frecuencia mayor que F_w .

10.2.2 Retardo de tiempo

Retardo de tiempo de un modo individual que se expresa mediante:

$$\tau = (p'/c) \times 10^3 \quad \text{ms} \quad (47)$$

donde:

- p' : distancia oblicua virtual (km) dada por las ecuaciones (13) y (19), y la altura de reflexión, h_r , que se definió en el § 5.1
- c : velocidad de la luz (km/s) en el espacio libre.

El retardo de tiempo diferencial entre los modos puede determinarse a partir de los retardos temporales de cada modo.

10.2.3 Procedimiento de predicción de la fiabilidad

Para predecir la fiabilidad se aplica el siguiente procedimiento:

Para trayectos de hasta 9 000 km:

Paso 1: La intensidad del modo dominante, E_w , se determina mediante los métodos descritos en § 5.2 y § 5.3.

Paso 2: Se identifican todos los demás modos activos con intensidades que superan el valor ($E_w - A$ (dB)).

Paso 3: De los modos identificados en los Pasos 1 ó 2, se identifica el modo que llega en primer lugar y todos los modos dentro de la ventana de tiempo, T_w , medidos a partir del que llega en primer lugar.

Paso 4: Para trayectos de hasta 7 000 km, se realiza una suma de las potencias de los modos que llegan dentro de la ventana, o para los trayectos entre 7 000 y 9 000 km se emplea el procedimiento de interpolación dado en el § 5.4, y la fiabilidad básica del circuito, BCR, se determina aplicando el procedimiento indicado en el § 10.1. Para ello, se emplea el procedimiento del Cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.842. La relación señal/ruido requerida, S/N_r se utiliza en el Paso 10 de ese Cuadro.

Paso 5: Si alguno de los modos activos que se identificaron en el Paso 2 arrojan retardos de tiempo diferenciales que caen fuera de la ventana de tiempo, T_w , se determina la reducción de fiabilidad debida a estos modos aplicando un método similar al de la fiabilidad del circuito total que se describe en el Cuadro 3 de la Recomendación UIT-R P.842, sustituyendo las relaciones de protección relativas del Paso 3 del Cuadro 3 por la relación A e ignorando la variabilidad de un día a otro al fijar a 0 dB todos los parámetros en los Pasos 5 y 8. El resultado que aparece en el paso 14 de la Recomendación UIT-R P.842 es la fiabilidad del circuito digital (DCR) en ausencia de dispersión. Por consiguiente, la degradación de la fiabilidad debida a la interferencia multimodo (MIR) es la relación entre los valores obtenidos en el paso 14 y el paso 13 del Cuadro 3, de la Recomendación UIT-R P.842, es decir $DCR = ((BCR) \times (MIR)/100)\%$.

Obsérvese que puede resultar necesario reconsiderar los valores de las desviaciones de decilos dadas en los Pasos 6 y 9 del Cuadro 3, ya que la distribución de la probabilidad puede diferir cuando se tienen en cuenta modos individuales.

Paso 6: Fuera de las regiones y los horarios en los que se prevé dispersión, se estima que el desplazamiento de frecuencia provocado por un exceso de movimiento de las capas de reflexión será del orden de 1 Hz, y en este método se supone que dichos desplazamientos son despreciables.

Para trayectos superiores a 9 000 km:

La intensidad de la señal compuesta es la que se obtuvo en § 5.3. Se supone que los modos que conforman esta señal compuesta están contenidos en una dispersión del retardo temporal de 3 ms a 7 000 km, y que aumenta linealmente hasta 5 ms a 20 000 km. Si la ventana de tiempo especificada para el sistema es más pequeña que esa dispersión del retardo, puede predecirse que el sistema no cumplirá sus requisitos de calidad de funcionamiento.

10.3 Dispersión en las regiones ecuatoriales

Además del procedimiento descrito en el § 10.2 anterior, habrían de llevarse a cabo los siguientes pasos para calcular el ensanchamiento provocado por la dispersión, aprovechando el modelo de dispersión en las regiones ecuatoriales que se presenta en el Apéndice 1:

Paso 7: El ensanchamiento potencial del retardo temporal causado por la dispersión se define en el § 1 del Apéndice 1, la función de dispersión del retardo temporal se aplica a cada modo región F dentro de la ventana de tiempo y la intensidad de dispersión $p_{Tdispersión}$, que se encuentra en el borde de dicha ventana, T_w .

Paso 8: El ensanchamiento de la frecuencia causado por la dispersión se define en el § 2 del Apéndice 1, se aplica la función de dispersión de frecuencia, $p_{Fdispersión}$, al modo región F dominante y se encuentra la intensidad de dispersión de frecuencia simétricamente en los bordes de la ventana de frecuencia, F_w .

Paso 9: Si el valor de cualquier $p_{Tdispersión}$ y/o $p_{Fdispersión}$, en los bordes de las ventanas supera $(E_w - A)$, debe determinarse la probabilidad de dispersión en los puntos de control para los modos región F según figura en el § 3 del Apéndice 1. Cuando se considera más de un punto de control para un modo propagación, debe tomarse la mayor probabilidad.

Paso 10: La fiabilidad del circuito digital se expresa mediante la función:

$$DCR = ((BCR) \times (MIR) \times (1 - prob_{disp})/100)\% \quad (48)$$

donde la probabilidad de que aparezca dispersión, $prob_{disp}$, se define en el Apéndice 1 a este Anexo.

Apéndice 1 al Anexo 1

Modelo de dispersión de las señales decamétricas en las regiones ecuatoriales

1 El modelo de dispersión del retardo temporal de la potencia disponible a partir de la componente de dispersión $p_{Tdispersión}$ se expresa mediante una distribución seminormal:

$$p_{Tdispersión} = 0,056 p_m e^{\frac{-(\tau - \tau_m)^2}{2T_{dispersión}^2}}$$

para τ mayor que τ_m ,

donde:

- p_m : potencia recibida disponible de la reflexión especular del modo
- τ : retardo de tiempo considerado
- τ_m : retardo de tiempo del modo especular
- $T_{dispersión}$: desviación típica de la dispersión de retardo temporal en esta semidistribución, que se considera 1 ms.

2 En caso de ensanchamiento de la frecuencia, la dispersión es simétrica en torno a la frecuencia de transmisión con una forma de variación similar a la de la dispersión de retardo temporal:

$$p_{Fdispersión} = 0,056 p_m e^{\frac{-(f - f_m)^2}{2F_{dispersión}^2}}$$

donde:

- f : frecuencia considerada
- f_m : frecuencia central de transmisión
- $F_{dispersión}$: desviación típica de la dispersión de frecuencia, que se considera 3 Hz.

3 La probabilidad de que aparezca dispersión en un día de un mes, $prob_{disp}$ está dada por:

$$prob_{disp} = F_{\lambda_d} F_{T_l} F_R F_S$$

donde:

$$\begin{aligned}
 F_{\lambda_d} &= 1 && \text{para } 0^\circ < |\lambda_d| < 15^\circ \\
 F_{\lambda_d} &= \left(\frac{25 - |\lambda_d|}{10} \right)^2 \left(\frac{|\lambda_d| - 10}{5} \right) && \text{para } 15^\circ < |\lambda_d| < 25^\circ \\
 F_{\lambda_d} &= 0 && \text{para } 25^\circ < |\lambda_d| < 90^\circ
 \end{aligned}$$

donde λ_d es la inclinación magnética

$$\begin{aligned}
 F_{Tl} &= 1 && \text{para } 00 < T_l < 03 \\
 F_{Tl} &= \left(\frac{7-T_l}{4}\right)^2 \left(\frac{T_l-1}{2}\right) && \text{para } 03 < T_l < 07 \\
 F_{Tl} &= 0 && \text{para } 07 < T_l < 19 \\
 F_{Tl} &= (T_l-19)^2(41-2T_l) && \text{para } 19 < T_l < 20 \\
 F_{Tl} &= 1 && \text{para } 20 < T_l < 24
 \end{aligned}$$

donde:

T_l : hora local en el punto de control (h)

$F_R = (0,1 + 0,008R_{12})$ ó 1, tomándose el valor más pequeño, y R_{12} es el número de manchas solares

y

$$F_S = 0,55 + 0,45 \operatorname{sen}(60^\circ(m-1,5))$$

donde m es el número del mes.

4 El procedimiento de predicción consistirá en determinar los niveles de las componentes de dispersión de retardo temporal y de frecuencia en los límites de las ventanas de tiempo y de frecuencia especificados para el sistema de modulación que se emplee. Si la relación entre el mayor de estos dos niveles y el nivel de la componente especular del modo dominante se encuentra dentro de los límites especificados para la interferencia entre los símbolos del sistema, se prevé que el sistema fallará con una probabilidad expresada por la probabilidad de que aparezca dispersión.
