Distribuciones estadísticas de la propagación

Tema 3

Índice.

1. Introducción.

Desvanecimiento.

Las perturbaciones atmosféricas afectan a los radioenlaces provocando desvanecimientos de la señal, que es la caída de potencia respecto al valor nominal.

El valor nominal de potencia es la potencia recibida calculada mediante la fórmula de Friss en las mejores condiciones.

La señal recibida variará con el tiempo,es decir es una variable aleatoria. Ello es debido a que la propagación no es constante, sufriendo variación gaussiana.

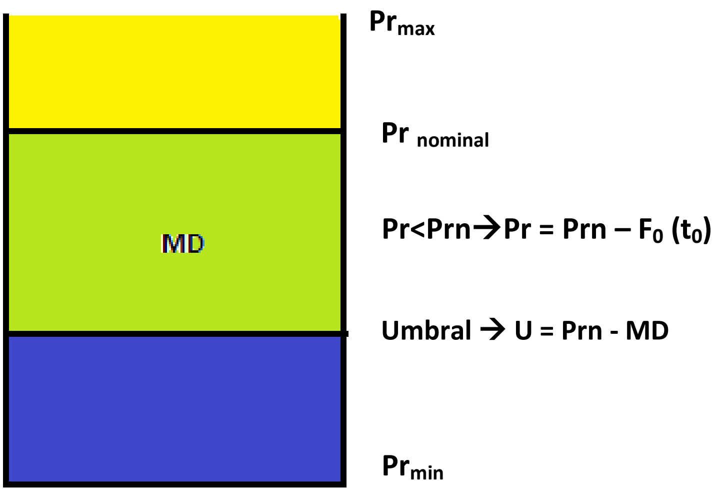
Esta variabilidad de la señal provoca desvanecimientos (pérdida de potencia).

Las variables aleatorias que vamos a modelar con el fin de controlar los desvanecimientos son la potencia, campo y flujo recibidos.

Margen de desvanecimiento.

El margen de desvanecimiento es la diferencia entre la potencia recibida nominal (potencia en condiciones de no desvanecimiento) y el umbral.

$$\boxed{MD = Prn - U}$$



Si el desvanecimiento en un instante de tiempo es mayor que el margen de desvanecimiento

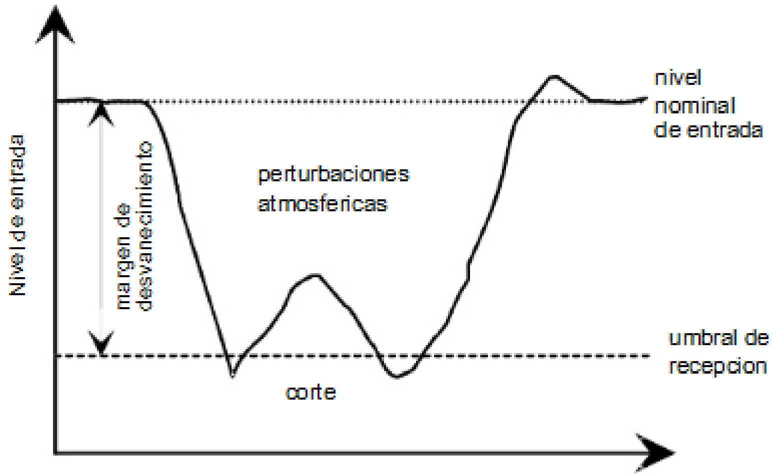
$$f_0(t_0) > MD$$

no somos capaces de extraer la información.

¿Por qué un margen de desvanecimiento?

La figura nos muestra el nivel de la señal de entrada en función del tiempo durante un fenómeno de desvanecimiento. Observamos que el nivel de entrada de la señal se encuentra por debajo del umbral en periodos cortos de tiempo, durante este tiempo hay una degradación del funcionamiento del sistema y existe la posibilidad de pérdida del servicio.

Por lo que como se puede apreciar a mayor margen de desvanecimiento, menor es la probabilidad de que la señal caiga por debajo del umbral y por lo tanto mayor calidad de servicio tendremos, ya que la probabilidad de no funcionamiento del mismo se verá reducida.



<u>Distribuciones estadísticas.</u>

- Función de densidad de probabilidad: es la probabilidad de que x tome un valor determinado.

$$f(x) = P(x = x_0)$$

- Función de distribución acumulativa: es la probabilidad de que x tome un valor menor o igual a x_0.

$$F(x_0) = P(x \leq x_0)$$

- Función de distribución acumulativa complementaria.

$$Q(x_0) = P(x > x_0) = 1 - F(x_0)$$

- $\overline{X}$: valor medio de todos los valores posibles de x.

- $\tilde{X}$: valor mediano, es el valor equiprobable, es decir:

$$Q(\tilde{x}) = F(\tilde{x}) = 0.5$$

Donde X es la variable aleatoria (Pr, Er, ɸr) y X_0 es una variable del rango de X.

Probabilidades de interés.

- No podemos extraer la información:

$$P(F > MD) = Q(MD) = P(Pr \leq U) = F(U)$$

- Podemos extraer la información:

$$P(F \leq MD) = F(MD) = P(Pr > U) = Q(U)$$

2. Sistemas punto a punto.

2.1. Condiciones normales.

Las condiciones normales son las condiciones de no desvanecimiento, siendo las pérdidas por propagación sin afectar el desvanecimiento:

$$L_b = L_{bf} + L_{gases} + L_{difracción} + L_{vegetación}$$

A estas pérdidas estudiadas anteriormente le vamos a añadir pérdidas por variabilidad temporal.

2.2. Variabilidad temporal.

Las causas de estas nuevas pérdidas son:

- <u>Centelleo:</u>son pequeñas variaciones que apenas afectan a nuestro sistema.

- <u>Factor K:</u>variación del índice de refracción troposférica. El factor de curvatura de la Tierra hace que, dependiendo de su valor, exista un obstáculo que provoque desvanecimientos o no. Para evitarlo tendremos que aumentar la altura de las antenas.

- <u>Espacial (modelo de dos rayos):</u> si el rayo reflejado no se suma en fase provoca pérdidas. Estos desvanecimientos pueden disminuir evitando el rayo reflejado de diversas maneras como ayudándose de un obstáculo que lo obstruya…

- <u>Lluvia:</u> el desvanecimiento es provocado por las moléculas del agua, afectando a frecuencias mayores de 10 GHz. Este desvanecimiento no se puede evitar.

Las características de estos desvanecimientos son:

- Son profundos (atenúan bastante).
- Son desvanecimientos lentos (su duración es mayor de 10 segundos).
- Planos (igual para todas las comunicaciones).
- Afectan a la disponibilidad.

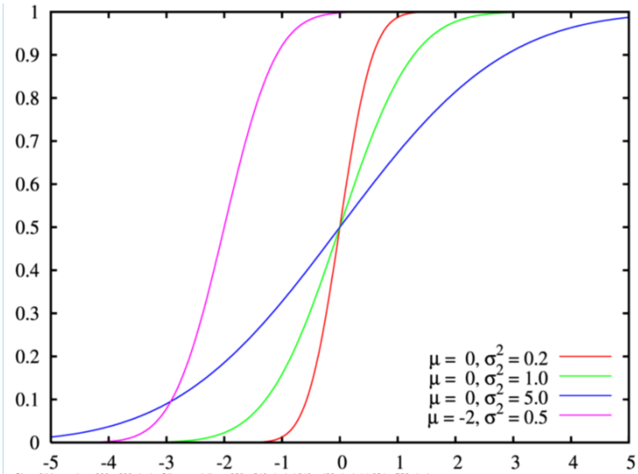
<u>Desvanecimientos lentos.</u>

Cualquiera de las anteriores causas provoca una variación lenta, que en el caso de que exista un desvanecimiento tarda más de 10 segundos en recuperarse el servicio.

Como es una variación lenta temporal a lo que afecta es a la realidad de disponibilidad, de manera que si nos encontramos por debajo del umbral durante más de 10 segundos podemos decir que el sistema es indisponible. La probabilidad de estar por debajo del umbral si es una variacion lenta es igual que la indisponibilidad.

Estos desvanecimientos son modelados para tratar de estudiarlos y evitarlos.

El modelo teórico que siguen es PDF Gaussiana. La función de distribución de probabilidad adopta la siguiente forma:



$$F\,(x) = 1 - \frac{1}{2}\,erfc\,(\frac{x - \overline{x}}{\sigma\sqrt{2}})$$

Las características más destacables de la PDF Gaussiana:

- X puede ser potencia P o campo E en unidades logarítmicas.

Si se encuentran en unidades naturales, siguen una PDF log-normal y simplemente las tendríamos que pasar a unidades logarítmicas.

- Es una función simétrica:

$$\mathrm{F}(-\mathrm{x}_0) = 1 - \mathrm{F}(\mathrm{x}_0) = \mathrm{Q}(\mathrm{x}_0)$$

- $\overline{\mathrm{X}} = \widetilde{\mathrm{X}}$

- Variable gaussiana de media cero y varianza unidad: normalizamos a t para poder utilizar la tabla de valores del modelo teórico gaussiano.

$$\mathrm{t} = \frac{\mathrm{X} - \overline{\mathrm{X}}}{\sigma}$$

t	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
-1.0	0.15865	0.15625	0.15386	0.15150	0.14917	0.14686	0.14457	0.14231	0.14007	0.13786
-0.9	0.18406	0.18141	0.17878	0.17618	0.17361	0.17105	0.16853	0.16602	0.16354	0.16109
-0.8	0.21185	0.20897	0.20611	0.20327	0.20045	0.19766	0.19489	0.19215	0.18943	0.18673
-0.7	0.24196	0.23885	0.23576	0.23269	0.22965	0.22663	0.22363	0.22065	0.21769	0.21476
-0.6	0.27425	0.27093	0.26763	0.26434	0.26108	0.25784	0.25462	0.25143	0.24825	0.24509
-0.5	0.30853	0.30502	0.30153	0.29805	0.29460	0.29116	0.28774	0.28434	0.28095	0.27759
-0.4	0.34457	0.34090	0.33724	0.33359	0.32997	0.32635	0.32276	0.31917	0.31561	0.31206
-0.3	0.38209	0.37828	0.37448	0.37070	0.36692	0.36317	0.35942	0.35569	0.35197	0.34826
-0.2	0.42074	0.41683	0.41293	0.40904	0.40516	0.40129	0.39743	0.39358	0.38974	0.38590
-0.1	0.46017	0.45620	0.45224	0.44828	0.44433	0.44038	0.43644	0.43250	0.42857	0.42465
-0.0	0.50000	0.49601	0.49202	0.48803	0.48404	0.48006	0.47607	0.47209	0.46811	0.46414

Si la señal tiene mucha variabilidad (↑↑σ) para mantener la calidad necesito aumentar el MD y si quiero una mayor calidad (probabilidad de no extraer la señal pequeña) necesito aumentad el MD.

Ejemplo.

Si la probabilidad de que la información no se recupere es del 30%, calcular MD.

P (F>MD) = 0.3

Normalizamos:

$t = \frac{X-\overline{X}}{\sigma} \rightarrow t = \frac{P_0-\overline{P}}{\sigma_p} = \frac{U-\overline{P}}{\sigma_p}$

Donde σ_p es la desviación típica.

Luego la probabilidad de superar el desvanecimiento es

$$P(P \leq U) = F(U) = F\left(\frac{U - \overline{P}}{\sigma_p}\right) = 0.3$$

Así que nos vamos a la tabla de normalización y buscamos 0.3 para obtener t que está entre -0.52 y -0.53.

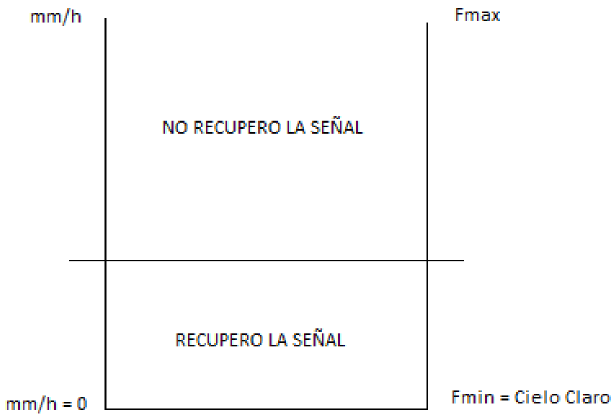
$$t = -0.525 = \left(\frac{U - \overline{P}}{\sigma_p}\right) = \frac{-MD}{\sigma_p}$$

Por lo que MD $=\overline{P} - U = 0.525\sigma_p$

Desvanecimiento por lluvia(F^{p}_{lluvia})

➢ INTENSIDAD DE LLUVIA (R).

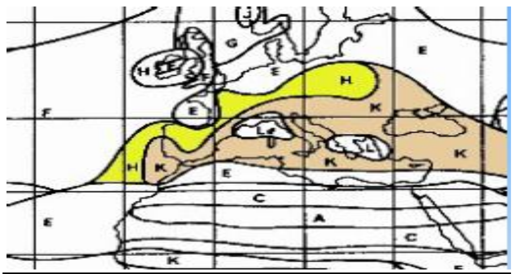
El parámetro que nos interesa estudiar no es cuánto tiempo llueve sino con qué intensidad lo hace.



Dicho parámetro es intensidad de lluvia (R) y se mide en [mm/h].

Como este valor no es constante porque no siempre está lloviendo y no siempre llueve con la misma intensidad, lo que me interesa es el valor que se supera en un tiempo determinado, en el más desfavorable o en el valor anual medio

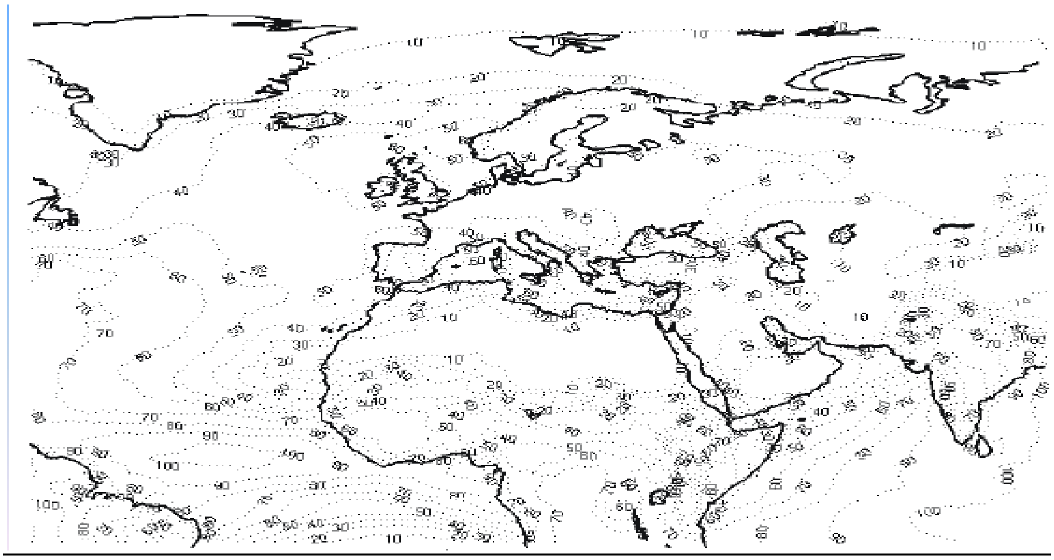
La intensidad de lluvia nos la dan en tablas o gráficas como la siguiente, donde se redactan los datos pertenecientes a cada región geográfica correspondiente:



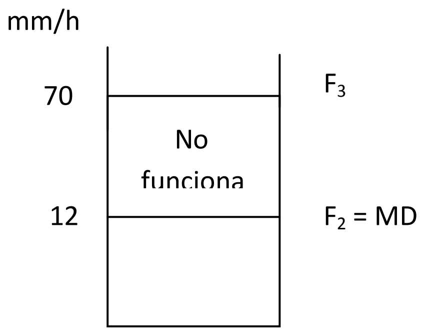
(%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
1.0	-	1	-	3	1	2	-	-	-	2	-	4	5	12
0.3	1	2	3	5	3	4	7	4	13	6	7	11	15	34
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250

Si nos dicen que en el 0.1 es de 3 significa que en el 0.1% del tiempo llueve con más intensidad de 3 mm/h.

O como ésta, que nos dan valores para p=0.01%:



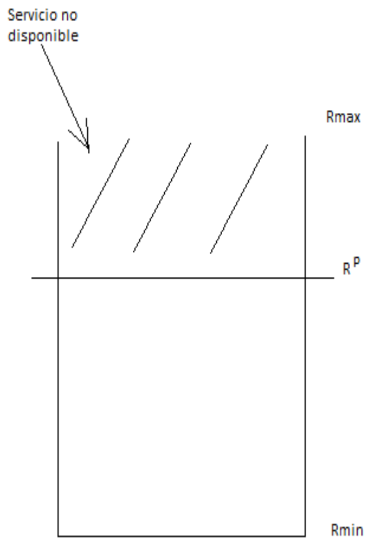
A continuación haremos un ejemplo de utilización de dicha tabla para la zona E:



Probabilidad de que llueva más de 1 mm/h es del 1%

Si F_2 = MD, la probabilidad de que no funcione el servicio es del 0.03% (12 mm/h)

Para conocer el parámetro R nos tienen que dar tanto su valor (mm/h) como el porcentaje de tiempo de de rebasamiento (p).



R^P =Durante P% del tiempo llueve más de esa intensidad R

¿Cuánto tiempo? Más de 10 segundos (desvanecimiento lento)

$$R^{0,01} < R^{0,1}$$

Esto quiere decir que es la probabilidad de que llueva en el 0,01% del tiempo (en un porcentaje muy pequeño llueve mucho) y en 0,1% del tiempo llueve con menor intensidad.

- <u>ATENUACIÓN ESPECIFICA</u>$(\gamma = KR^{\alpha} = dB/Km)$

Con la transformación de R →α conseguimos saber cuánto atenúa a nuestra señal este desvanecimiento.

Tanto K como α dependen de la frecuencia y de la polarización:

- Para polarización horizontal y vertical:

$$\log_{10}k = \sum_{j=1}^{4} a_j \exp\left[-\left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_j}\right)^{1}\right] + m_k \log_{10}f + c_k$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^{5} a_j \exp\left[-\left(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_j}\right)^{1}\right] + m_\alpha \log_{10}f + c_\alpha$$

- Para polarización oblicua y circular:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2$$

$$\alpha = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2k$$

Cuyos valores para los coeficientes vienen tabulados en las siguientes tablas:

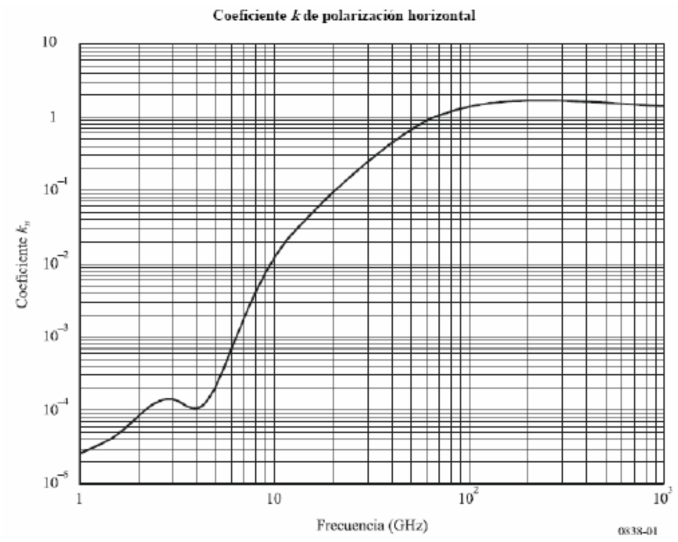
Coeficientes para k_V

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	−3,80595	0,56934	0,81061	−0,16398	0,63297
2	−3,44965	−0,22911	0,51059		
3	−0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Coeficientes para α_V

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	−0,07771	2,33840	−0,76284	−0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	−0,20238	1,14520	0,26809		
4	−48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

O bien en gráficas o tablas como las siguientes donde tenemos el valor de k y α en función de la frecuencia:



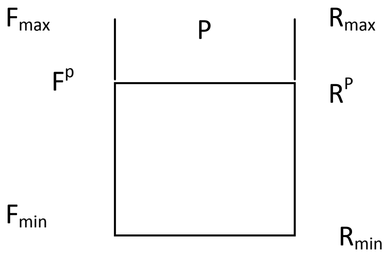
Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
86	1,2398	0,7006	1,2376	0,6929
87	1,2504	0,6990	1,2484	0,6915
88	1,2607	0,6974	1,2590	0,6902
89	1,2708	0,6959	1,2694	0,6889
90	1,2807	0,6944	1,2795	0,6876
91	1,2903	0,6929	1,2893	0,6864
92	1,2997	0,6915	1,2989	0,6852
93	1,3089	0,6901	1,3083	0,6840
94	1,3179	0,6888	1,3175	0,6828
95	1,3266	0,6875	1,3265	0,6817
96	1,3351	0,6862	1,3352	0,6806
97	1,3434	0,6850	1,3437	0,6796
98	1,3515	0,6838	1,3520	0,6785
99	1,3594	0,6826	1,3601	0,6775
100	1,3671	0,6815	1,3680	0,6765

La polarización horizontal atenúa más que la vertical ya que las gotas de agua son más anchas que largas, luego si calculamos k y α para la polarización horizontal nos encontraremos ante el peor caso posible y si lo cumple, cumple los demás casos. Por lo que si no nos dicen cuál es la polarización que tenemos que utilizar escogemos la horizontal ya que es el peor caso.

Una vez conocidoα, el desvanecimiento por lluvia en el p% del tiempo es:

$$F_{\mathrm{lluvia}}^{p} = F_0 = K\, R^{\alpha} L_{ef} [\mathrm{dB}]$$

Donde L_{ef}(Km) es la longitud efectiva.



F^pes el desvanecimiento por lluvia q se rebasa (supera) en el p% del tiempo

Luego la probabilidad de superar F^p→ P ($F>F^p$) = p

Sabiendo que la probabilidad de que el sistema no funcione es P(F>MD), si F^p = MD entonces p% del tiempo tenemos indisponibilidad (p coincide con la indisponibilidad).

La F^{p}_{lluvia} también se puede calcular de la siguiente manera:

- Calculamos $F^{0.01}_{\text{lluvia}}$ $\longrightarrow$ $F^{0.01}_{\text{lluvia}} = K\,R^{\alpha}_{0.01} L_{ef}$

Con una longitud efectiva $\longrightarrow$ $L_{ef} = \frac{d}{1+\frac{d}{d_0}}$

Siendo $d_0 = 35 \exp(-0.015\, R_{0.01})$

Para $R_{0.01} \leq 100 \text{mm/h}$ y $R_{0.01}$ la obtenemos de la gráfica en la que p=0.01%.

- Corregimos para p=[0.001-1]%

  - Para latitudes superiores a 30^0 Norte o Sur.

$$F^{p}_{\text{lluvia}} = F^{0.01}_{\text{lluvia}} \cdot 0.07 \cdot p^{-(0.855+0.139 \log p)}$$

  - Para latitudes inferiores a 30^0 Norte o Sur.

$$F^{p}_{\text{lluvia}} = F^{0.01}_{\text{lluvia}} \cdot 0.12 \cdot p^{-(0.546+0.043 \log p)}$$

<u>Ejemplo.</u>

Un sistema está disponible el 99.999% del tiempo si Frx = 4 dB.

¿Ptx para que esté disponible el 99.999% del tiempo?

1) <u>Tema 2. Condiciones umbrales.</u>

U = (C/N) +N (N con el dato de Frx)

2) <u>Tema 3. MD.</u>

MD = Prx – U
Esta fórmula solamente tiene sentido si están calculadas en el mismo punto del receptor.

MD= $F^{0.001}_{\text{lluvia}}$

Hallamos en primer lugar $F_{lluvia}^{0.01}$ para posteriormente calcular $F_{lluvia}^{0.001}$ mediante la corrección y una vez que lo tengamos despejamos Prx:

Prx = MD + U

3) <u>Tema 1. Condiciones de no desvanecimiento.</u>

Prx = Ptx – Ltt + Gtx – Lb + Grx – Ltr

De donde obtenemos la potencia transmitida mínima que hace que mi sistema esté disponible el 99.999%.

<u>Ejemplo.</u>

Si ahora conocemos Ptx y Frx, ¿calidad?

1) <u>Tema 1. Condiciones de no desvanecimiento.</u>

Prx = PIRE – Lb + Grx – Ltr

Luego ya conocemos Prx

2) <u>Tema 2. Condiciones umbrales.</u>

U = (C/N) +N (N con el dato de Frx)

También conozco U ya que Frx es conocida

3) <u>Tema 3. MD.</u>

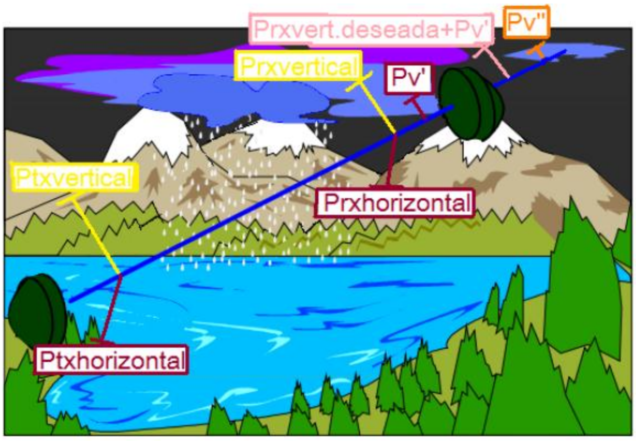
MD = Prx – U

Y una vez tengamos MD, tenemos que despejar p (%) de la fórmula correspondiente según la latitud:

MD = $F_{lluvia}^{0.01}$ X $p^{-\gamma}$

➢ DESPOLARIZACIÓN POR LLUVIA.

La lluvia además de atenuar despolariza la señal por lo que va a aparecer una XPD por lluvia, al aparecer una polarización parásita.



$$XPD = U - V\log\left(F^{p}_{lluvia}\right)$$

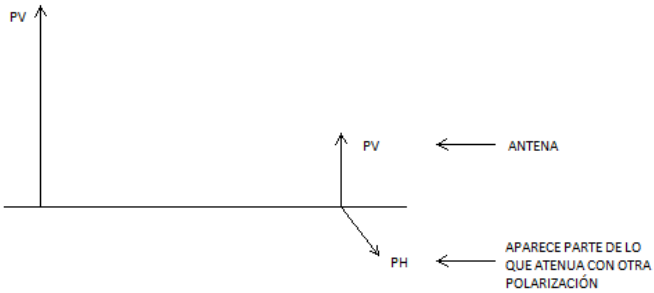
F^{p}_{lluvia} para la polarización deseada

$$U = 15 + 30\log(f)$$

$$V = \begin{cases} 12{,}8 f^{0{,}19} & 8 < f \leq 20\ \text{GHz} \\ 22{,}6 & 20 < f \leq 35\ \text{GHz} \end{cases}$$

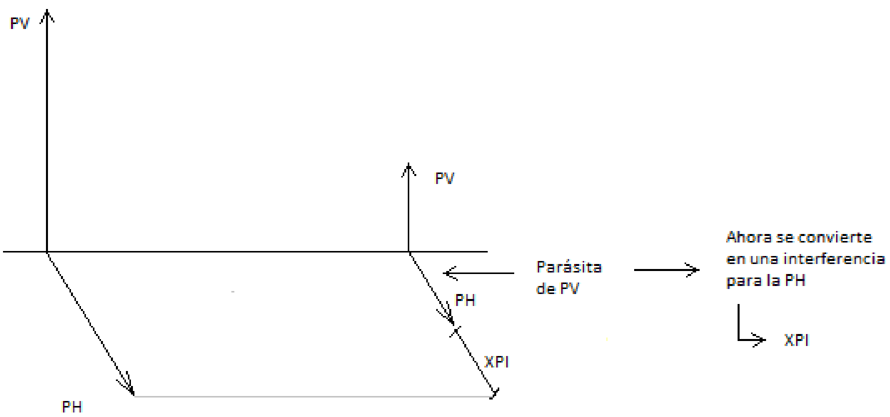
$$XPD_{LLUVIA} = \frac{Prx_V}{P'rx_H}$$

Donde Prx_V es la deseada y $P'rx_H$ es la parásita.



XPD_{LLUVIA} : Nos interesa saber cuánto se ha transferido de la potencia con polarización inicial en la ortogonal.

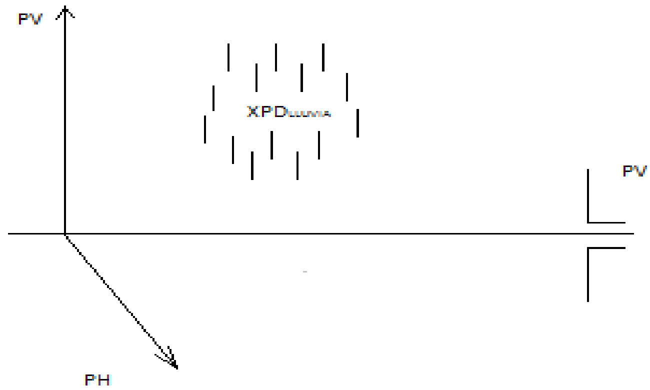
$$XPD \equiv \frac{\text{Potenciaconpolarizacióndeseada}}{\text{Potenciaparásitadebidaalalluviaconpolarizaciónortogonal}}$$



$$XPI = \frac{Prx_H Señaldeseada}{\Sigma Prx_{PARÁSITAS}}$$

Ejemplo.

Tx en horizontal y se desplaza en vertical debido a la lluvia:



$$\text{Deseada} \rightarrow P_{RX}{}^{V-V} = PIRE - L_{bf} - F_{LLUVIA}{}^{PV} + G$$

$$\text{INTERFERENCIA}\begin{cases} P_{RX}{}^{V-H-V} = PIRE - L_{bf} - F_{LLUVIA}{}^{PV} - XPD^{(V-H)}{}_{LLUVIA} + G - XPD_{ANTENA} \\ P_{RX}{}^{H-V} = PIRE - L_{bf} - F_{LLUVIA}{}^{PH} + G - XPD_{ANTENA} \\ P_{RX}{}^{H-V-V} = PIRE - L_{bf} - F_{LLUVIA}{}^{PH} - XPD^{(V-H)}{}_{LLUVIA} + G \end{cases}$$

$$XPI = P_{RX}{}^{V-V} - 10 \cdot LOG(\Sigma\, i)$$

$P_{RX}{}^{V-V}$=Señal con polarización vertical (V) que llega a la antena con polarización vertical(V)

$P_{RX}{}^{V-H-V}$= Señal con polarización vertical (V) que se convierte en horizontal por efecto de la lluvia (H) y que llega a la antena con polarización vertical

Reflexión en el suelo.

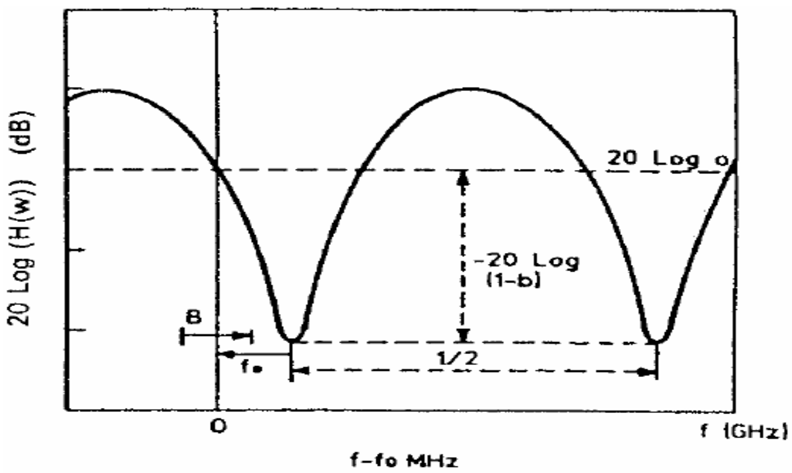
La reflexión en el suelo lo que nos produce es que a determinadas frecuencias se produzca máximo desvanecimiento, así que lo único que tenemos que hacer es evitar esas frecuencias.

¿Cómo las evitamos?

Como vamos a ver a continuación, la manera más sencilla de evitarlo es trabajar a frecuencias donde no haya mínimo.

A veces no tenemos otra opción que trabajar a estas frecuencias por lo que solucionamos el problema cambiando las alturas de las antenas y de esta manera somos capaces de cambiar también el mínimo.

Si tampoco podemos variar las alturas de las antenas, utilizamos un sistema reflectante que haga que el rayo reflejado llegue a las dos antenas, espaciadas verticalmente, de tal manera que se sumen en oposición de fase.



El campo recibido es:

$$e = e_0 \, (1 - Re^{j\emptyset})$$

Donde: e_0≡ Campo RX en espacio libre.

R≡ Coeficiente de reflexión en la tierra→|R|$e^{J\beta}$ (Módulo y fase)

$$\emptyset_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta l_{RD-RR}$$

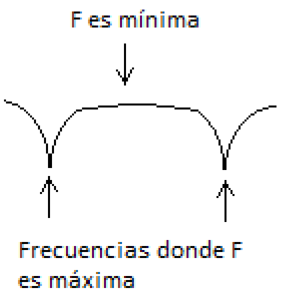
Δl_{RD-RR} se trata del incremento de longitud entre rayo directo y rayo reflejado.

El desvanecimiento es:

$$F = \frac{e_0^2}{e^2} = \frac{1}{1 + \ |R|^2 + \ 2|R| \cos(\beta + \omega\tau)}$$

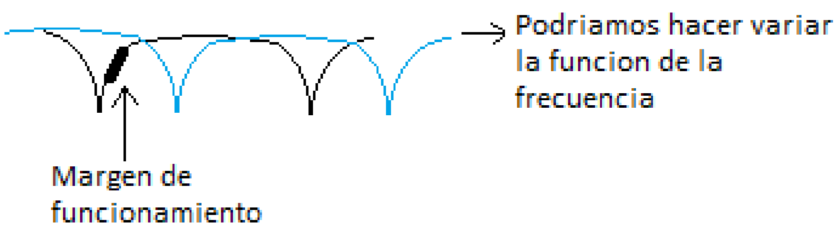
Y se hace máximo cuando se suman en contrafase.

F_{max}→$\omega\tau + \beta = (2n + 1)\pi$



Las frecuencias maximas son frecuencias que queremos evitar, por lo que hacemos un estudio para saber cuales son esas frecuencias y evitarlas.

¿Cómo hacemos para poder evitar esas frecuencias con un desvanecimiento muy grande si nos toca trabajar en ese margen de funcionamiento?

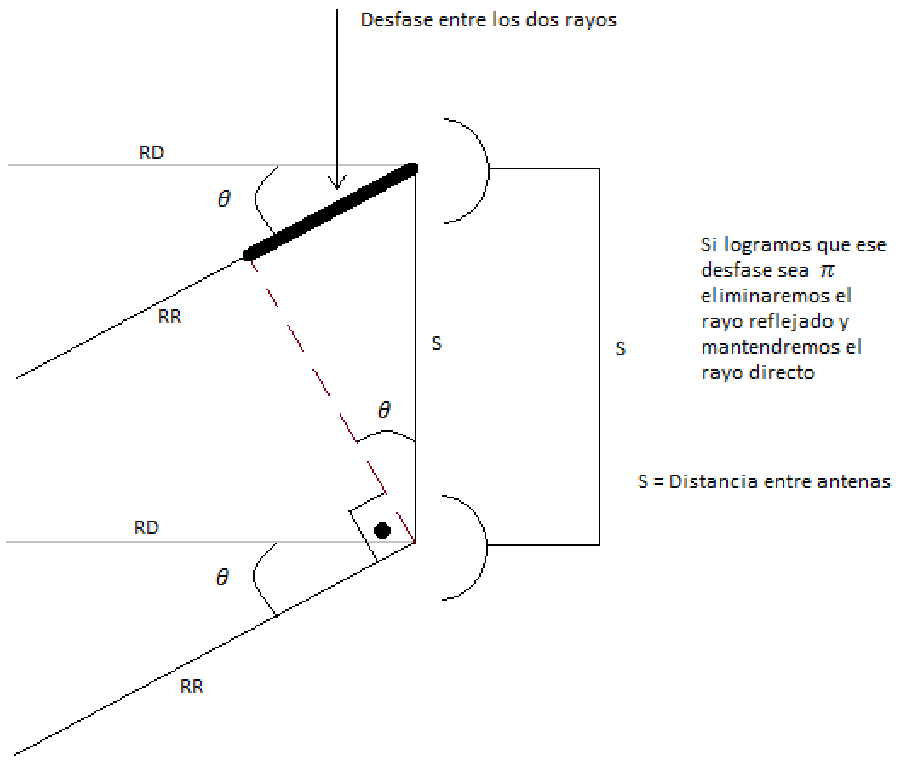


- <u>1ª Forma</u> → Cambiando la altura de las antenas

Para ello, como $(2n + 1)\pi$es fijo y ω tambien lo es, cambiamos la altura de las antenas en $\tau = \frac{\Delta l}{c}$

(Δl ≡ Alturas de las antenas[metros])

- <u>2ª Forma</u> →Con sistemas antireflectantes.



En este caso tendremos que cambiar la distancia entre las antenas → S

Para ello:

$$\mathrm{Sen}\theta = \frac{\Delta l}{S}$$

$$\Delta l = S \cdot \mathrm{Sen}\theta$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \mathrm{Sen}\theta \cdot S = \pi$$

$$\boxed{S = \frac{\lambda}{2\mathrm{Sen}\theta}\ [\mathrm{metros}]}$$

3. Sistemas punto a multipunto o punto a zona.

En este tipo de sistemas además de existir variabilidad temporal nos encontramos con variabilidad espacial.

En este caso se utilizan métodos semiempíricos que pueden ser variables en función del entorno en el que se está propagando, es decir, puede ser distinta la formula si estoy trabajando dentro de un ambiente que si estoy trabajando fuera o en otro ambiente distinto por eso hablamos de la propagación de trayectos mixtos. En los cuales siempre nos tenemos que asegurar que hay continuidad en los puntos de discontinuidad.

3.1. Condiciones normales punto a zona.

Trayectos mixtos.

En condiciones normales ó de no desvanecimiento:

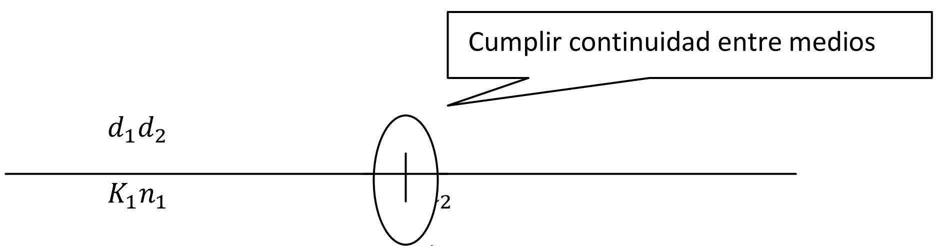
$L_b = \begin{Bmatrix} \text{Okumura} - \text{Hata} \\ \text{Cost } 231 \end{Bmatrix} = K \cdot d^n$ (Se puede poner de forma general)

K = constante del medio
n = constante de propagación del medio

Situación	Exponente de pérdidas en el trayecto (n)
Espacio libre	2
Celda urbana	2,7 a 3,5
Celda urbana con celda	3 a 5

Ejemplo→ En el espacio libre: $L_b = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot d^2 \rightarrow n = 2$

Para el cálculo de trayectos mixtos tendremos que cumplir continuidad en el punto frontera:



$K_1 {d_1}^{n_1} = K_2' {d_2}^{n_2}$

Ejemplo de propagación por trayectos mixtos:

$d_1 d_2 d_3$

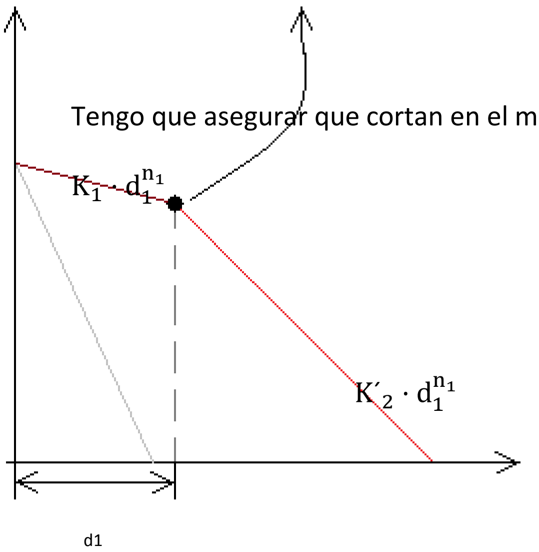
$K_1 n_1$ | Espacio libre | $K_3 n_3$

$$L_b \neq K_1 \cdot d_1^{n_1} + K_2 \cdot (d_1 + d_2)^{n_2} \leftarrow \begin{cases} \text{Porquenosondostrayectosseparados} \\ \text{(Hayquecumplircontinuidad)} \end{cases}$$

$\boxed{K_1 \cdot d_1^{n_1} = K'_2 \cdot d_1^{n_2}}$

Condición: Continuidad

Tengo que asegurar que cortan en el mismo punto



Quiero que el medio 2 empiece en el punto señalado

K´₂→ Actualizada para empezar en el punto

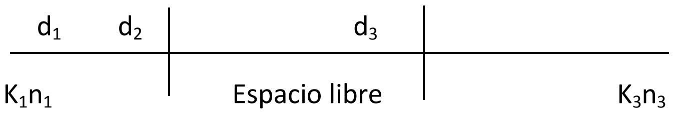
$K_2 \cdot d_1^{n_2}$

$$d < d_1 \rightarrow L_b = K_1 \cdot d_1^{n_1}$$

$$d > d_1 \rightarrow L_b = K'_2 \cdot d_1^{n_1}$$

$$K_1 \cdot d_1^{n_1} = K'_2 \cdot d_1^{n_2} \rightarrow \boxed{K'_2 = K_1 \cdot d_1^{(n_1 - n_2)}}$$

Ejemplo.



- $L_b(d < d_1) = K_1 \cdot d_1^{n_1}$
- $L_b(d_1 < d < d_1 + d_2) \rightarrow \mathrm{Debemoscumplircontinuidadend_1}$

$$K_1 \cdot d_1^{n_1} = K'_2 \cdot d_1^{n_2}$$

$$K_1 \cdot d_1^{n_1} \neq \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot d_1^2 \rightarrow \begin{cases} \mathrm{NopuedoutilizarK_2} \\ \mathrm{SinoK'_2} \end{cases}$$

La constante no es $\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2$ porque depende de lo que ha pasado antes.

$$\boxed{K_1 \cdot d_1^{n_1} = K'_2 \cdot d_1^{n_2}}$$

$$L_b(d_1 < d < d_1 + d_2) = \underbrace{K_1 \cdot d_1^{(n_1-2)}}_{K'_2} \cdot d^{n_2}$$

- Hasta el medio 3 → Otra discontinuidad en (d_1+d_2)

Antes de la discontinuidad Después de la discontinuidad

$$K_1 \cdot d_1^{n_1-2}(d_1+d_2)^{n_2} \qquad = \qquad K'_3 \cdot (d_1+d_2)^{n_3}$$

3.2. Variabilidad temporal.

Lo primero es que a estas frecuencias que se da este tipo de sistema prácticamente la lluvia no afecta, asique la causa principal por la que existe desvanecimiento es el multitrayecto.

Causas y características.

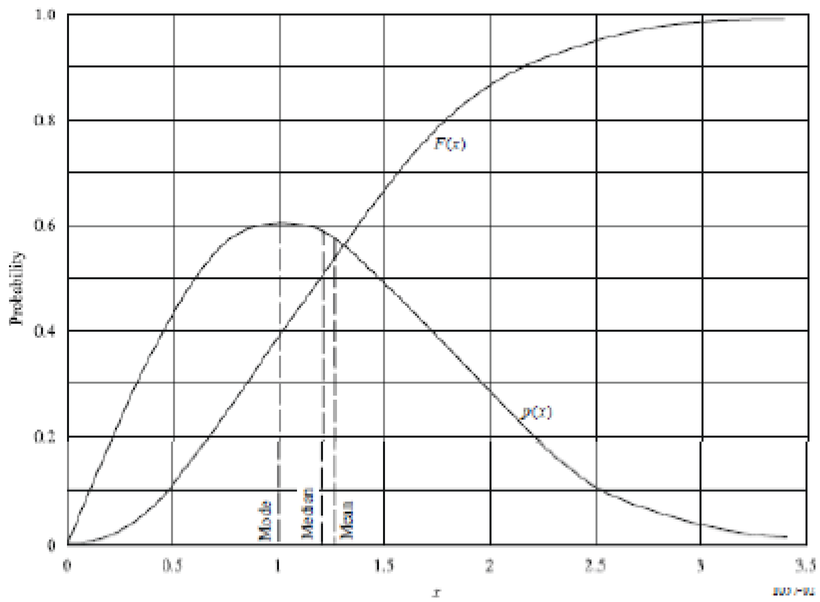
- Las variaciones temporales son debidas a multitrayecto y rebotes.
- Las consecuencias son desvanecimientos muy profundos.
- Los desvanecimientos son rápidos en el tiempo, de duración menor a 10 segundos.
- No repercuten por igual a todas las frecuencias, es decir son de selectivos en frecuencia de RF.
- La afectación es a la calidad de fidelidad.

*Por los tanto q*ue sean menos de 10 segundos significan que el sistema sigue siendo disponible pero la señal que llega no se parece a la que se está transmitiendo, por lo tanto, la calidad que viene determinada por este tipo de desvanecimientos rápidos es la calidad de fidelidad.

Modelo teórico: PDF Rayleigh.

El modelo que utilizamos para determinar la calidad de fidelidad es el Rayleigh.

Modela la variación de campo en unidades naturales. Con este modelo calcularemos la probabilidad de que exista desvanecimiento, que caiga el umbral. Existen 2 métodos de cálculo, por ecuaciones y con gráfica



$$F(e) = 1 - exp\,(-\frac{e^2}{\bar{e}^2})$$

$$F(e) = 1 - exp\,(-0.693\frac{{e_0}^2}{\tilde{e}^{\,2}})$$

- X sólo modela el e_{RX} (unidades naturales).
- $\overline{X}$: Valor medio de todos los valores de X posibles.
- $\tilde{X}$: Valor mediano es el valor equiprobable.
- La potencia recibida en unidades naturales →PDF exponencial negativa

Si e_{RX} sigue una Rayleigh, la potencia sigue una exponencial negativa.

Ejemplo.

Si $Q(\tilde{e}) = exp\,(-\frac{\tilde{e}^{\,2}}{\bar{e}^{\,2}})$ = 0.5⟶ $-\frac{\tilde{e}^{\,2}}{\bar{e}^{\,2}} = ln0.5 = ln\,1/2$⟶ $\tilde{e}^2 = \bar{e}^2\,ln\,2$

A continuación, quedándonos con el valor mediano como condiciones normales porque es lo que ocurre normalmente, vamos a ver como se calcula la probabilidad de superar o no el umbral en función primero de las fórmulas y posteriormente del papel Rayleigh

Ejemplo.

P(F>MD) = 5% (durante ese 5% de tiempo la señal recibida será distinta a la transmitida, pero el sistema siempre estará disponible).

P(F>MD) = 5% $\longrightarrow$ $P(e<e_{umbral}) = F(e_{umbral}) = 1 - \exp\left(-0.693\,\frac{{e_{umbral}}^2}{\tilde{e}^{\,2}}\right) = 1 - \exp\left(-0.693\,\frac{1}{md}\right) = 0.05$

Como podemos ver MD es igual a e_{umbral}, además :

$$md = \left(\frac{e_{CN}}{e_{umbral}}\right)^2 = \left(\frac{\tilde{e}}{e_{umbral}}\right)^2$$

Luego: $\exp\left(-0.693\,\frac{1}{md}\right) = 0.95 \longrightarrow md = 13.51 \longrightarrow MD = 11.30\ dB$

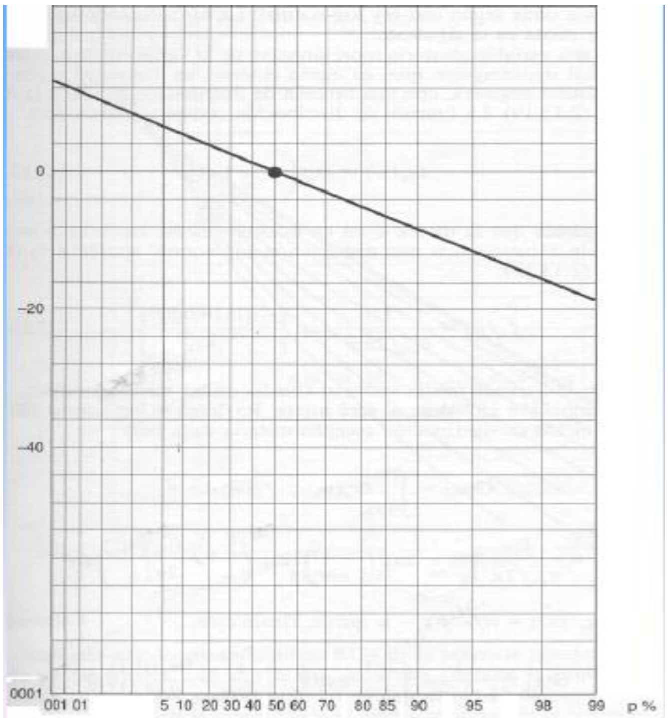
Al igual que pasaba con el punto a punto, cuanto más calidad quiero más MD tengo que tener.

Este ejemplo también lo podríamos haber realizado con el papel Rayleigh , que se caracteriza por tener una función de distribución F (o Q) en dB.

Puedo representar : $P_0 - \tilde{P}\,\tilde{P} - P_0$

$E_0 - \tilde{E}\,\tilde{E} - E_0$

F(F (dB)) es una recta.



Coordenadas del papel:

- Normalización.
- Probabilidad de superar o no el umbral.

$$G(E_0 - \tilde{E}) = G(P_0 - \tilde{P})$$

Ejemplo.

Otra manera de realizar el anterior ejercicio es mediante este método

Antes teniamos :

P(e<e_{umbral}) = P(E<E_{umbral}) = P($\mathrm{E}-\widetilde{\mathrm{E}}<\mathrm{E}_0-\widetilde{\mathrm{E}}$)

normalizamos

Y vemos que en la gráfica anterior tenemos $\mathrm{E}_0-\widetilde{\mathrm{E}}$, luego coincide con nuestro caso. En el caso de no coincidir tendríamos que hacer -P(..) y se resuelve cambiando de dirección el operador (>).

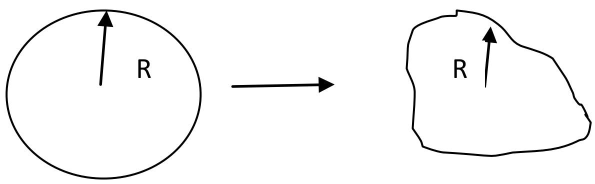
Como es <, es F=F(-MD)=5%.

La gráfica nos da Q en lugar de F, luego Q(-MD) = 95%

Y según la gráfica -MD = -12dB, por lo que MD = 12dB.

3.3.Variabilidad espacial.

Como se ha comentado con anterioridad la variabilidad temporal afecta a la calidad de nuestro servicio, en cambio, la variabilidad espacial va a afectar a la cobertura.



Es una variación lenta (E o P en dB sigue una normal gaussiana)

Varianza (σ): representa la variabilidad del terreno o la variabilidad del movimiento.

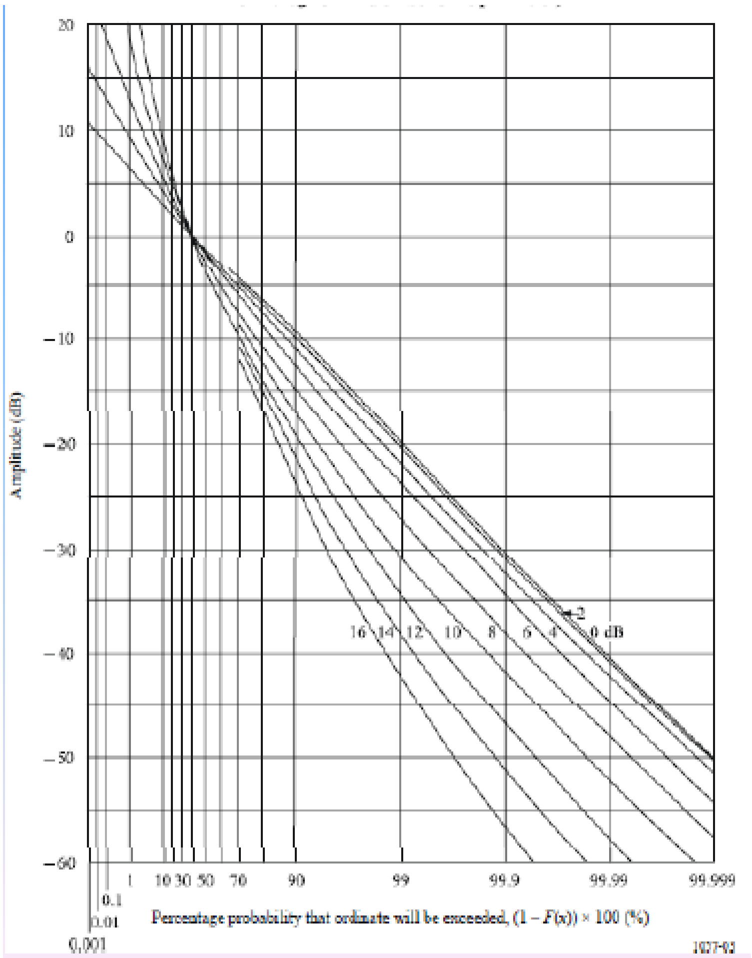
3.3.Variabilidad total.

Si estoy quieto en un punto el e^2 sigue una exponencial negativa, luego depende del valor medio por estar donde estoy ($\overline{e^2}$). En cambio si me muevo $\overline{e^2}$sigue una log - normal.

La mezcla entre ambas sigue una PDF RLN (R -variación rápida temporal- y L -variación lenta espacial-)

Este modelo siempre está disponible (rápida) pero puede no tener cobertura.

Es un desvanecimiento rápido cuya media sigue una variación lenta.



$$Q\begin{cases} E - \bar{\bar{E}} \\ P - \bar{\bar{P}} \end{cases}$$

Valor normalizado con respecto a la madia sectorial ($\bar{\bar{X}}$) que es la media de los valores medios

Si σ = 0 no hay variabilidad espacial, sólo queda variabilidad temporal.

4. Calidad del servicio.

La calidad del servicio me dice o me da una medida de cómo es el servicio que estoy ofreciendo, durante cuánto tiempo se está ofreciendo adecuadamente y en ese tiempo que se está ofreciendo con qué calidad está llegando, si realmente se parece a lo que se está transmitiendo o no. Así que tenemos dos tipos de calidad.

$$\mathbf{c^2 + 2b = 1 = (x / \overline{x})}$$

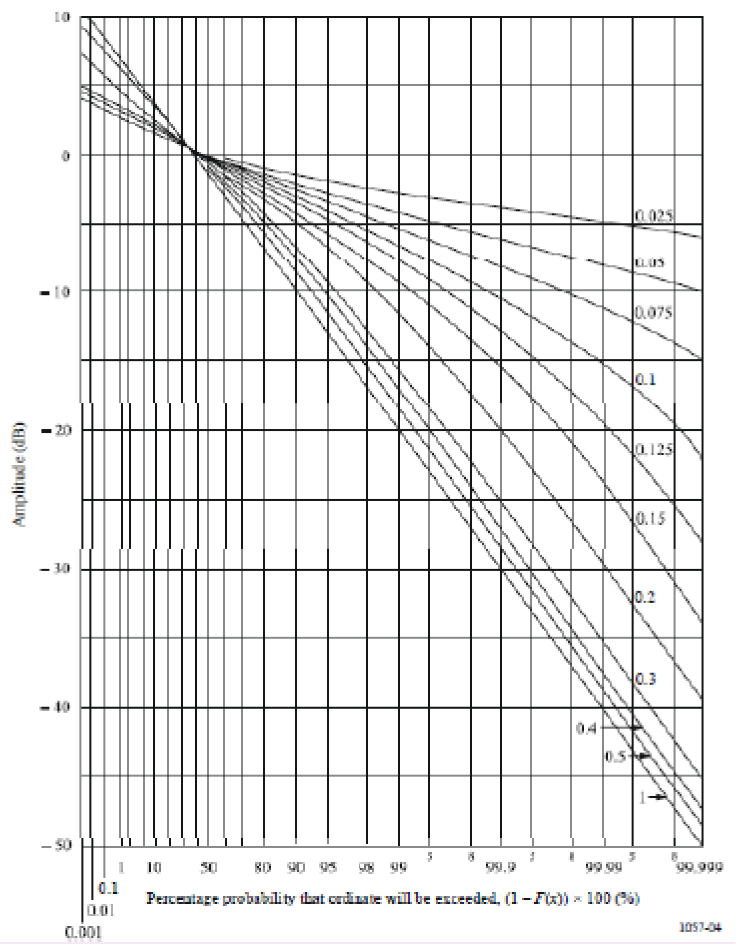
- c^2 = RD (componente determinista)
- 2b = RR (componente aleatoria)

En general, no existen solamente ni las variaciones lentas ni variaciones rápidas sino que pude haber una mezcla entre ambas, de hecho si hay mucha variación lenta hay poca variación rápida y si hay mucha variación rápida es porque hay poca variación lenta.

- Punto a punto ⟶ componente determinista ⟶ $c^2 \approx 1$ ⟶ PDF Gaussiana.
- Multitrayecto ⟶ componente aleatoria ⟶ $2b \approx 1$ ⟶ PDF Rayleigh.

Si en los extremos es Gaussiana y Rayleigh entre medias hay un abanico que se modela a través de un modelo NAKAGAMI-RICE.

<u>Modelo teórico: PDF Nakagami-Rice.</u>



Cálculo de la calidad de servicio.

Como hemos visto a lo largo del tema las variaciones rápidas afectan a una cosa y las lentas a otra, por lo que separamos ambos efectos.

- Calidad de disponibilidad.

La calidad de disponibilidad nos dice cuánto tiempo está disponible el servicio.

Para calcular la calidad de disponibilidad nos fijamos en las variaciones lentas:

- El factor K y el rayo reflejado si no nos dicen nada colocamos las alturas de las antenas para evitarlos.
- La lluvia causa indisponibilidad ⟶ U = P (F>MD) ⟶ MD = $P_{RX\ no\ lluvia}$ - $P_{RX\ máx\ lluvia}$ = F^{u}_{lluvia}

- Calidad de fidelidad.

  La calidad de fidelidad nos dice el porcentaje de tiempo que se recibe una señal igal a la que se transmite.

  Nos fijamos en las variaciones rápidas y está condicionada a que el sistema esté disponible.
  La causa de la infidelidad es el multitrayecto.

  Ley de los 10 dB/década:

  Calidad de fidelidad = Probabilidad de extraer la información * P (F>MD) = $P_0 \cdot 10^{(-MD/10)}$

  - P_0 ⟶ es el factor de aparición de multitrayecto, significa que siempre que calculo la calidad de fidelidad está condicionada a la calidad de disponibilidad.

  - $10^{(-MD/10)}$ ⟶ por cada 10 dB que se incrementa MDla calidad crece en 1 década.

  ¿Cómo se obtiene P_0?

  - ✓ Método Mojoli.

$$P_0 = 0.3\ a\ b\ \left(\frac{f}{4}\right)\left(\frac{d}{50}\right)^3$$

  - ✓ Método UIT-R P-530 simplificado.

$$P(F) = \ k\ d^3\left(1+\left|\varepsilon_p\right|\right)^{-1/2} 10^{0.033f-0.001h_L-F/10}\ \ (\%)$$

Tenemos que tener claro que mejorar la calidad significa que el sistema funcione mejor, sin embargo para calcular la calidad se calcula lo contrario:

- Para calcular la calidad de disponibilidad hay que calcular el porcentaje en el que se estémás indisponible, cuanto más pequeño sea este porcentaje más calidad tendrá.
- Para calcular la calidad de fidelidad, hay que calcular el porcentaje en el que se esté más infiel, de tal manera que cuanto más pequeño es este porcentaje, más fidelidad tendremos.

Posteriormente hay que calcular el PORCENTAJE DE REVASAMIENTO DEL MARGEN DE DESVANECIMIENTO. Cuanto más pequeño sea el porcentaje, significa que tenemos más calidad. (Siempre que hablamos de calidad, hablamos de algo para superar el MD, por lo tanto siempre es en términos negativos, al estar por debajo del umbral, ya sea por causa de variaciones lentas, ya sea por causa de variaciones rápidas)

<u>¿En qué % de tiempo calculamos la calidad?</u>

Calculamos la calidad en el % de tiempo del mes más desfavorable.

$$\left.\begin{array}{c}\%\ (\text{Tiempo})\text{Indisponible} \\ \%\ (\text{Tiempo})\text{Infiel}\end{array}\right\} mes\ mas\ desfaborable \begin{Bmatrix} Mes\ 1 & \cdots & P_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Mes\ 12 & \cdots & P_{12} \end{Bmatrix}$$

Se define el mes más desfavorable como aquel mes de doce meses civiles consecutivos en los que la probabilidad de superar el margen de desvanecimiento es mayor.

Cogemos un mes y medimos cual es la probabilidad de superar la indisponibilidad en ese mes y nos sale P_1, pillo otro mes y me sale otra P… Así sucesivamente durante doce meses civiles consecutivos. Bueno pues aquel valor que me da mayor margen de rebasamiento ese es el mes más desfavorable, de hecho ese es el porcentaje que voy a utilizar.

Lo que se hace es obtener un % de rebasamiento anual medio. En lugar de hacerlo para cada mes, directamente durante todo el año miro cuantas veces se rebasa el MD.

Y lo que si existe es una fórmula para pasar de este porcentaje anual medio, al porcentaje del mes más desfavorable ($P_{Anual\ Medio} \leftrightarrow P_{Mes\ más\ desfaborable}$).

FTRMD = f (FTRAM)

- FTRMD ≡ Factor de Tiempo de Rebasamiento del Mes más Desfavorable
- FTRAM ≡ Factor de tiempo de Rebasamiento Anual Medio

Si llamamos al Factor de Tiempo de Rebasamiento del Mes mas Desfavorable P_W y al Factor de tiempo de Rebasamiento Anual Medio P, la relación entre los dos depende de un factor Q (según la recomendación) que a su vez depende de dos parámetros:Q_1 y β

FRTMD = Q*FTRAM ~~p_w = Q*p~~

$$Q(p) = 12 \qquad p < \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{1/\beta}$$

$$Q(p) = Q_1 \cdot p^{-\beta} \qquad \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{1/\beta} < p < 3\%$$

$$Q(p) = Q_1 \cdot 3^{-\beta} \qquad 30 < p < 30\%$$

$$Q(p) = Q_1 \cdot \left(\frac{p}{30}\right)^{\frac{\log\left(Q_1 \cdot 3^{-\beta}\right)}{\log 0,3}} \qquad 30 < p\%$$

VALORES DE β; Q_1					
Región	*Lluvia*		*Multitrayecto*	*Trayectos trasnshorizonte*	
	Trayecto terrenal	*Trayecto oblicuo*		*Tierra*	*Mar*
Mundial	0,13; 2,85	0,13; 2,85	0,13; 2,85	0,13; 2,85	0,13; 2,85
Noroeste Europa	0,13; 3,00	0,10; 3,10	0,13; 4,00	0,18; 3,30	0,11; 5,00
Europa mediterránea	0,14; 2,60	0,16; 3,10			

Lo importante es que lo medimos en el año y una vez tengo ese valor obtenemos el valor del mes más desfavorable porque cuando hablamos de porcentaje de calidad siempre hablamos del mes más desfavorable (lo peor que nos puede suceder, siempre nos pondremos en el peor de los casos).

5. RECOMENDACIÓN P-1546

Lo primero que nos dice la recomendación es que la utilizamos para calcular campo recibido (E_{RX}) en sistemas principalmente punto-multipunto aunque se puede adaptar a sistemas punto-zona que trabajan en una banda de frecuencias que van desde los 30MHz a 3000MHz.

$$30MHz \leq f \leq 3000MHz$$

De tal manera que si yo tuviese un servicio en ese rango de frecuencias que fuese punto-multipunto, necesito un método semiempírico que me proporcione los valores de campo recibido, ese método semiempírico es el que me proporciona la recomendación, eso mas las condiciones normales, mas las variaciones añadidas.

$$E_{RX}\ en\ sistemas\ pto.-mlutipunto \rightarrow \underbrace{C.N.}_{\substack{(Metodo\ semiempirico)\\ Campaña\ de\ medidas\\ +\\ Correcciones}} + \underbrace{Variaciones}_{\substack{Temporales\\ Espaciales}}$$

Partimos primero de unas medidas, es decir, como es un sistema punto-multipunto tenemos unas condiciones normales y unas variaciones temporales y espaciales (las condiciones normales se han obtenido a través de un método semiempírico) por lo tanto de una campaña de medidas, mas las correcciones necesarias para ajustarlas a mi sistema.

Es decir, imaginaros que han medido a 600MHz ¿Qué pasa si mi sistema trabaja 500MHz? Tendré que ajustarlo o corregirlo.

¿Coincide con lo que hemos visto? Vamos a ir desgranándolo y lo primero que vamos a ver es la campaña de medidas.

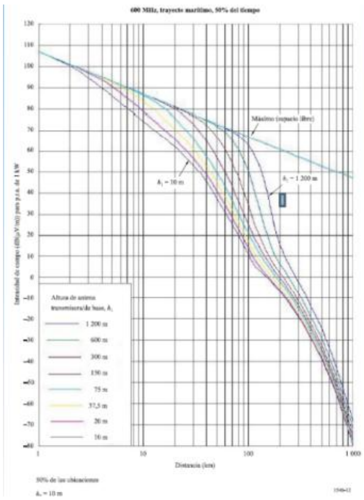
- Campaña de medidas

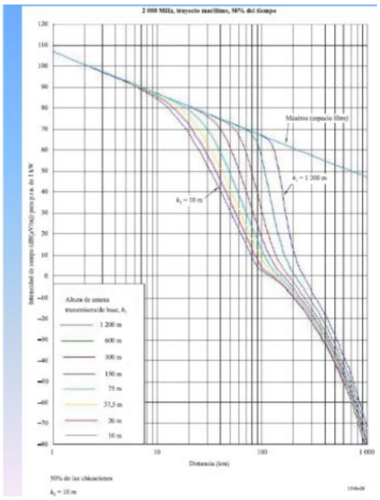
  Quiero obtener Campo recibido, ¿Eso de qué depende?
  Para establecer mi campo de medidas lo que tengo que ver es en qué condiciones voy a medir:

  - ✓ Frecuencia:
    - Depende de la frecuencia a la que trabajemos el campo será distinto.

  - ✓ Tengo que establecer unas frecuencias a las que medir (100,600 y 2000MHz).

- ✓ Distancia:
  - Gráficas





- ✓ Las alturas de las antenas:

  - Puede afectar a un rayo reflejado e incluso a la difracción.
  - Alturas definimos dos:

    - Una <u>altura equivalente del transmisor</u> (h_1), que no altura de la antena, ya que debe de tener en cuenta la altura de la antena y lo que le rodea.
    - Como se trata de un sistema punto –multipunto he de suponer que las antenas se encuentran situadas a la misma altura.
    -
    -

$$
\begin{cases}
h_1 \begin{cases}
d < 3Km \rightarrow h_1 = h_{TX} \text{ (altura antena transmisora)} \\
\updownarrow \\
d > 15Km \rightarrow h_1 = h_{TX} + cota - h_{media_{(3\ a\ 15Km)}} \\
\\
Nota: nos\ puede\ dar\ valores\ negativos\ de\ h_1\ eso \\
significará\ que\ la\ antena\ estará\ rodeada\ de\ obstaculos \\
\\
Si\ 3Km < d < 15Km\ ya\ nos\ daran\ la\ fórmula\ para\ calcularlo
\end{cases} \\
h_2 \begin{cases}
10m\ (Zona\ rural\ de\ una\ a\ dos\ plantas\ o\ maritima) \\
20m\ (Suburbana: periferia, de\ 2\ a\ 4\ plantas) \\
30m\ (Centro\ urbano)
\end{cases}
\end{cases}
$$

- ✓ Potencia: PARA=1KW

✓ Trayectos:

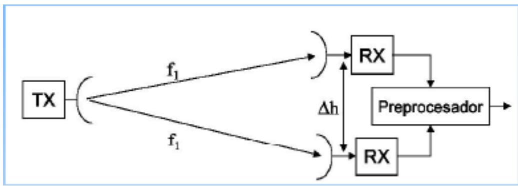
- La propagación depende del entorno por lo que habrá que tener en cuenta los tipos de trayecto
- Hay tres tipos:
    - Terrestre
    - Mar frío
    - Mar cálido

6. TÉCNICAS DE DIVERSIDAD

6.1 Definición y tipos.

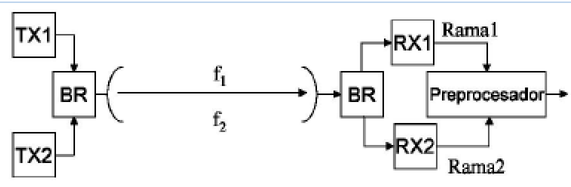
Enviar la señal por caminos radioeléctricos distintos, independientes:

- Espaciales (multitrayecto)



$$I = \left[1 - \exp(-0{,}04 \cdot s^{0{,}87} \cdot f^{-0{,}12} \cdot d^{0{,}48} \cdot P_0^{-1{,}04})\right] \cdot 10^{(F-V)/10}$$

- Mismo camino, distinta frecuencia (multitrayecto)



$$I = \frac{80}{f \cdot d}\left(\frac{\Delta f}{f}\right) \cdot 10^{F/10}$$

- Temporales (desvanecimiento por lluvia)
- Polarizaciones distintas en mismo camino (multitrayecto)

Estas técnicas producen:

- Reducción de los efectos de desvanecimientos rápidos
- Mejora de la diversidad:

$$I = \frac{P(F > MD)}{P_D(F < MD)}$$

$$I = factor\ de\ mejora$$

6.2 Técnicas de selección

- Selección por conmutación: en cada instante la mejor SNR:

$$\frac{S}{N_{out}} = \frac{S}{N_{max}}$$

- Selección por combinación lineal:
  - Suma en unidades de campo de las señales deseada
  - Suma en unidades de potencia de las señales ruidosas

$$\frac{\sum(\text{unidades de campo})^2 \text{ deseada}}{\sum(\text{unidades de potencia})\text{ruidosa}}$$

- Selección por combinación por relación máxima:

$$\frac{\sum(\alpha \text{ unidades de campo})^2 \text{ deseada}}{\sum(\alpha^2 \text{ unidades de potencia})\text{ruidosa}} \rightarrow \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{N}_{\mathrm{out}}} = \sum \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{N}}$$