

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de
Telecomunicación

Radioenlace hospital de Estella-Silo



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Idoia Ilundain Idoate

Ramón Gonzalo García

Pamplona, 27 de junio de 2014



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Ubicación.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos del proyecto.....	2
2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS PARA EL DISEÑO DE ENLACES DE MICROONDAS	3
2.1 Nivel de señal del receptor	3
2.1.1 Atenuación en el espacio libre.....	3
2.1.2 Pérdidas por gases y vapores atmosféricos.....	4
2.1.3 Pérdidas por lluvia.....	5
2.1.4 Pérdidas en los radioenlaces de microondas.....	8
2.2 Modelo de tierra plana.....	8
2.3 Zonas de Fresnel.....	9
2.4 Umbral.....	10
2.5 Desvanecimientos.....	10
2.5.1 Desvanecimiento plano y selectivo	10
2.5.2 Desvanecimiento multitrayecto	11
2.6 Margen bruto de desvanecimiento.....	12
2.7 Calidad del radioenlace	12
2.7.1 Indisponibilidad de los radioenlaces de microondas	12
2.7.2 Parámetros de calidad de error	17
2.7.3 Calidad de fidelidad de un radioenlace digital	18
2.8 Codificación y modulación adaptativa (ACM)	20
2.8.1 Scripts ACM Radio	21
2.8.2 ACM con potencia de transmisión adaptativa.....	21
2.8.3 XPIC	22
2.8.4 Implementación de XPIC	22
2.8.5 Mecanismo de recuperación XPIC	23
3. SELECCIÓN DEL RADIOENLACE.....	25
3.1 Descripción del radioenlace.....	25
3.2 Banda de frecuencias a utilizar.....	30
3.3 Equipos y prestaciones	32
3.4 ANTENAS	36
4. CÁLCULO Y ESTUDIO DEL RADIOENLACE	37

4.1 Introducción a SIRENET.....	37
4.2 Simulación del radioenlace hospital de Estella-Silo en SIRENET	38
5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	48
6. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS	
REFERENCIAS	
ANEXO I - Especificaciones IP20-C	
ANEXO II - VHLP-26	

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los empleados y compañeros, por unos meses, de NASERTIC que a mi llegada me acogieron como una más y por la paciencia que han necesitado conmigo.

RESUMEN

Actualmente, la demanda de capacidad que requieren los hospitales para transmitir las diferentes pruebas médicas, como son TACs y resonancias entre otras, ha aumentado considerablemente.

La empresa pública NASERTIC, se encarga de la mejora y el mantenimiento de la red corporativa del Gobierno de Navarra. Por la mayor demanda de capacidad de transmisión por parte de los hospitales, esta empresa plantea mejorar y aumentar la capacidad del enlace que interconecta el hospital García Orcoyen de Estella y el Complejo Hospitalario de Navarra.

El radioenlace presente que interconecta los hospitales de Estella y Pamplona consta de tres saltos. El primero va desde el hospital García Orcoyen de Estella hasta Belastegui; el siguiente vano va desde Belastegui hasta la Higa de Monreal y desde esta última, hasta los Edificios Inteligentes de Pamplona. Este último vano tiene una capacidad de 140Mbps pero en la Higa se bifurca hacia Belastegui y el hospital de Tudela, por lo que finalmente la capacidad de la que dispone el hospital es 40 Mbps. Se trata de un radioenlace de baja capacidad para la gran demanda de alta velocidad en la transmisión de datos.

Para aumentar la capacidad, la nueva conexión entre el hospital de Estella y el Complejo Hospitalario de Navarra contará de un tramo de fibra desde Pamplona hasta el Silo de Estella aprovechando la canalización de la autopista y, desde el Silo al hospital García Orcoyen mediante un radioenlace de 1Gbps.

Este proyecto se centrará en el radioenlace que une el Silo con el hospital de Estella con capacidad de 1Gbps.

En primer lugar se planifica la ubicación de los equipos de radio. Un equipo se colocará en el tejado del hospital García Orcoyen de Estella, el otro equipo se colocará en el Silo de Estella situado en el extremo opuesto de la localidad. El enlace es de corta distancia con 3.45km.

El segundo paso es comprobar qué banda de frecuencias están libres en esa zona, para ello se hace uso de un programa del Ministerio de Industria llamado Semibanda o bien se puede consultar en el documento “Cuadro de atribución de frecuencias” que saca el Ministerio de Industria cada nueve meses.

Conociendo las características del radioenlace como distancia, capacidad y frecuencia, se eligen los equipos radio. Por ello se opta por el equipo IP-20C de Ceragon el cual emplea doble polarización en la misma frecuencia de manera que teniendo ambas polarizaciones la capacidad de 500 Mbps aproximadamente, se alcanza en total más de 1 Gbps. Dicho equipo puede trabajar en diferentes bandas de frecuencia y con diferentes anchos de banda. Se elige la frecuencia de 26 GHz y un ancho de banda de 56MHz.

Una vez seleccionado los equipos de radio, se eligen las antenas que se van a utilizar para el radioenlace. Estas son las VHLP3-26 de Andrew, que tienen un diámetro de 1m y trabaja en la banda de 26 GHz.

Por último, sabiendo los equipos que se van a usar, se procede a la simulación del mismo. Para ello se utiliza el programa de simulación SIRENET, en el que se introduce los datos mencionados así como datos climatológicos de la zona en la que se encuentra, como probabilidades de intensidad de lluvias y densidad de vapor de agua. Con este software se comprueba la viabilidad del radioenlace, que como requisito mínimo la indisponibilidad no debe superar el 0.04% del tiempo. En los resultados aparece el perfil topográfico y muestra la visibilidad directa que existe entre los extremos del radioenlace. Así mismo, se comprueba que el 60% de la zona de Fresnel está libre y que la señal recibida en el receptor es mayor que la sensibilidad del mismo.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Ubicación

Navarra de servicios y tecnologías.SA (NASERTIC) es una empresa pública contratada por el Gobierno de Navarra con la finalidad de mejorar y mantener la red corporativa del Gobierno así como de realizar proyectos que éste solicita.

Se crea en el año 2011 mediante la fusión por absorción de dos empresas públicas: PRODUCCIÓN INFORMÁTICA DE NAVARRA S.A.U. (PIN) y OBRAS PÚBLICAS Y TELECOMUNICACIONES DE NAVARRA S.A.U. (OPNATEL) por parte de NAVARRA DE SERVICIOS S.A.U. (NASERSA).

Entre otras funciones y proyectos que se están llevando a cabo, NASERTIC como empresa perteneciente al Gobierno, está realizando un proyecto que consiste en mejorar un radioenlace existente al este de la comunidad foral de Navarra, en la localidad de Estella.

Durante cuatro meses he realizado prácticas curriculares y el proyecto fin de grado en NASERTIC.

1.2 Justificación

El hospital García Orcoyen de Estella es el tercero más grande de Navarra con 97 camas instaladas. El hospital carece de laboratorio por lo que todas las muestras a analizar se mandan a Pamplona para su análisis y el resultado es devuelto a Estella. Todas las pruebas médicas de imagen excepto la ecografía requeridas por personas pertenecientes a la zona de Estella, se realizan en Pamplona y sus resultados se mandan de nuevo a Estella.

El número de resultados enviados al hospital de Estella aproximadamente en un año es de 60.984. Lo que se traduce en una gran cantidad de información a transmitir entre los hospitales de ambas localidades.

El radioenlace tendido actualmente con esta finalidad consta de varios vanos. Del hospital de Estella hasta el repetidor de Belastegui, de ahí, a la Higa de Montreal y el siguiente receptor está en los edificios inteligentes. Entre la Higa y los edificios inteligentes, el radioenlace tiene una capacidad de 140 Mbps, pero en la Higa se bifurca hacia Belastegui y el hospital de Tudela. Finalmente la capacidad de la que dispone el hospital de Estella es 40 Mbps.

El enlace tiene una cierta antigüedad y no es ya suficiente para un intercambio óptimo de datos, ya que la cantidad de información cada vez es mayor y se demanda una mayor velocidad.

Es por ello por lo que se propuso este proyecto que consiste en establecer un radioenlace desde el hospital García Orcoyen hasta el silo de Estella con una capacidad de 1Gbps.

1.3 Objetivos del proyecto

Con la realización de este proyecto se pretende mejorar la calidad de transmisión entre ambos hospitales. Para ello se aumentará la capacidad del radioenlace a 1Gbps de manera que la velocidad de transmisión de los datos se incrementará.

Para lograr la transmisión con Pamplona, el enlace constará de un radioenlace que vaya desde el hospital García Orcoyen de Estella hasta un silo situado en el extremo opuesto de la localidad, en el polígono industrial Merkatondoa a 3.45km de dicho hospital. De ahí, a través de unos 500 m de fibra hasta el centro de conservación de Estella, a partir del cual se llega hasta el Complejo Hospitalario de Navarra mediante fibra aprovechando las canalizaciones de la autopista.

2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS PARA EL DISEÑO DE ENLACES DE MICROONDAS

En la siguiente sección se describen y explican los conceptos teóricos que se necesitan para la realización del proyecto y que se requieren para la comprensión del mismo.

2.1 Nivel de señal del receptor

Este apartado trata de mostrar los diferentes medios de transmisión y fenómenos atmosféricos que pueden darse en el entorno en el que se localiza el radioenlace, que atenúan a la señal transmitida como son, el espacio libre, gases, vapores atmosféricos y lluvia.

2.1.1 Atenuación en el espacio libre

Independientemente de la frecuencia de las ondas radioeléctricas, a medida que la onda se aleja del transmisor y recorre el espacio libre, el frente de onda se ensancha y acarrea una disminución de la densidad de potencia de la misma.

La densidad de flujo de potencia en el espacio libre viene determinada por la expresión 2.1.

$$\wp = \frac{P_{TX} * G_{TX}}{4\pi * L^2} \quad (2.1)$$

Y la potencia recibida en la antena receptora se define en la ec. 2.2.

$$P_{RX} = \frac{\wp * \lambda^2 * G_{RX}}{4\pi} \quad (2.2)$$

de lo que se deduce la expresión 2.3.

$$\frac{P_{RX}}{P_{TX}} = \frac{\lambda^2 * G_{TX} * G_{RX}}{(4\pi L)^2} \quad (2.3)$$

G_{TX} = Ganancia de la antena transmisora

G_{RX} = Ganancia de la antena receptora

L = Longitud del radioenlace punto a punto

El término $(\lambda/4\pi L)^2$ se denomina pérdidas en el espacio libre (L_{bf}) suponiendo que se trata de antenas isótropas.

La expresión 2.4 son las pérdidas expresadas en decibelios.

$$(2.4)$$

$$L_{bf} = 32.5 + 20 * \log f_{(MHz)} + 20 * \log L_{(Km)} \quad (dB)$$

2.1.2 Pérdidas por gases y vapores atmosféricos

Si el radioenlace se encuentra total o parcialmente en la troposfera hay que tener en cuenta las pérdidas que añaden los gases presentes en ella.

Para frecuencias inferiores a 10 GHz, la atenuación por gases es prácticamente despreciable. A partir de esta frecuencia, la atenuación aumenta en función de la misma.

Esta atenuación viene determinada por la ecuación 2.5.

$$a = \gamma_{atm} * L_{atm} \quad (dB/km) \quad (2.5)$$

donde γ_{atm} es la atenuación específica causada por la absorción de parte de la energía de la onda electromagnética por los gases de la atmósfera terrestre. L_{atm} es la longitud de trayecto de las ondas dentro de la atmósfera.

La atenuación causada por cada tipo de gas es distinta.

La Figura 2.1 muestra los distintos valores de atenuación específica (γ_{atm}) para cada gas y en unas condiciones similares a las que tendrían lugar en un radioenlace terrestre.

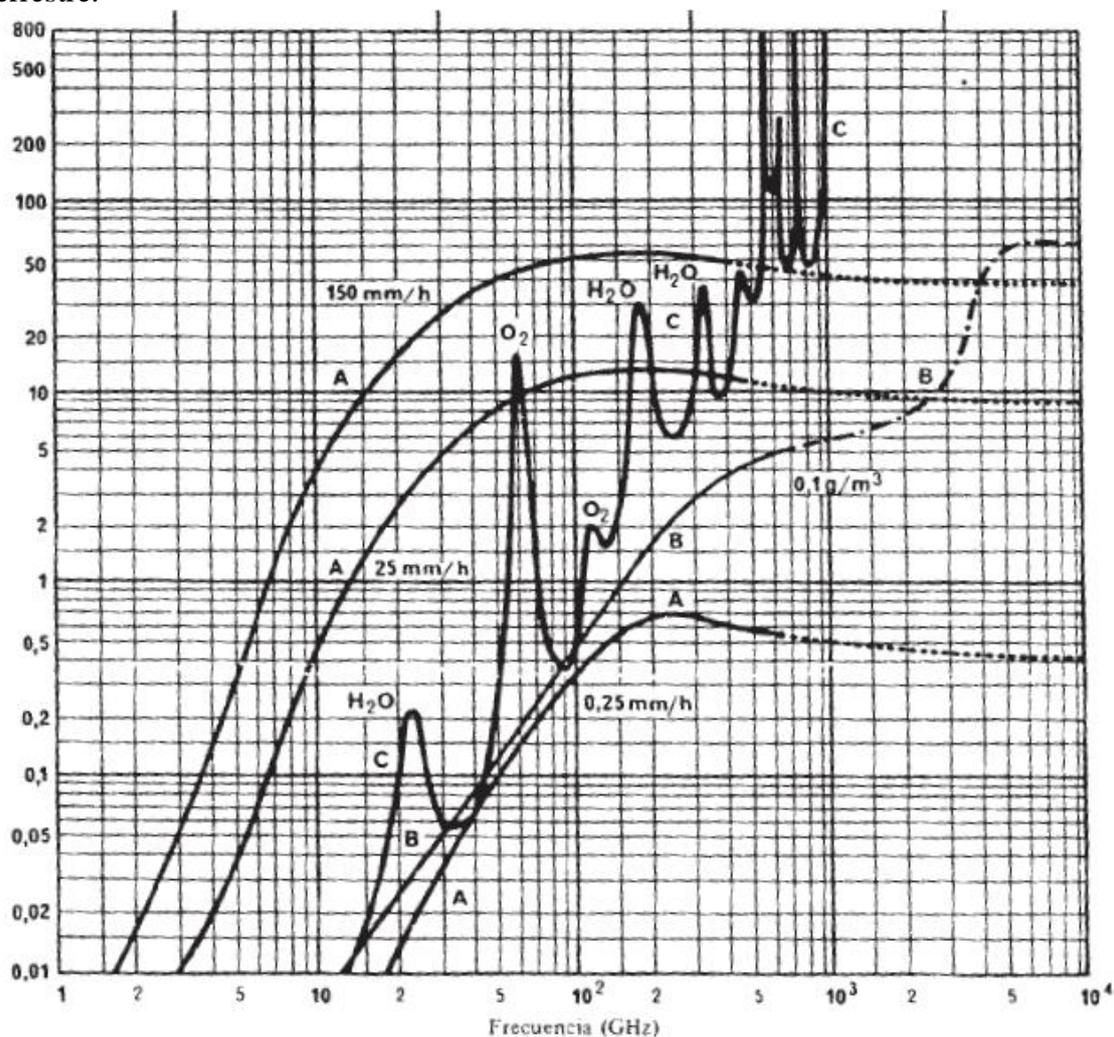


Figura 2.1: Valores de atenuación específica para un trayecto próximo a la superficie de la tierra. A: lluvia, B: niebla, C: gases.

La atenuación es producida en su mayor parte por el oxígeno y el vapor de agua a diferencia del resto de gases, los cuales influyen poco a frecuencias menores de 250 GHz.

La atenuación total será la suma de las producidas por los diferentes gases.

2.1.3 Pérdidas por lluvia

Cualquier obstáculo de tamaño característico interpuesto en el trayecto de propagación absorbe y dispersa la energía de la onda propagada.

Este es el caso de los posibles hidrometeoros presentes en el trayecto como lluvia, niebla, granizo, nieve, etc.

La atenuación producida por la niebla (nubes), se considera despreciable a frecuencias inferiores a 50-100 GHz, debido a que las gotas de agua en la niebla son mucho más pequeñas que la longitud de onda.

La atenuación producida por granizo y nieve se aprecia a esas frecuencias, pero no es determinante a frecuencias inferiores a 50GHz.

En cambio, la atenuación producida por la lluvia es mucho más significativa. Se pueden distinguir dos casos, la lluvia de alta intensidad o la de baja intensidad.

Las lluvias finas o de baja intensidad ($R < 0.25$ mm/h), a frecuencias inferiores a 100 GHz causan atenuaciones γ_R similares a las de la niebla por lo que se consideran despreciables.

La de alta intensidad, por ejemplo $R = 25$ mm/h, es la mayor causa de atenuación en estas frecuencias, y es debido al mayor grosor de las gotas de agua y a la cantidad de gotas que se encuentran dentro de la primera zona de Fresnel en cada instante de tiempo. La atenuación supera 0.5 dB/km a frecuencias mayores de 10GHz, y es ≥ 10 dB/km para frecuencias mayores a 100GHz. La atenuación es mayor si la lluvia es tipo torrencial ($R \geq 100$ mm/h).

Todo lo mencionado hasta ahora se refleja en la Figura 2.1.

Un punto a tener en cuenta es el comportamiento de las gotas de lluvia al caer. La velocidad de caída de las gotas varía muy rápidamente con el incremento de su diámetro por lo que la resistencia aerodinámica las deforma, convirtiéndolas en elipsoides cada vez más planos, y en el momento en el que alcanzan un diámetro de 6 mm aproximadamente, la gota se rompe. Como consecuencia del aplanamiento de las gotas, la atenuación es más significativa en la polarización horizontal que en la vertical.

La atenuación causada por la lluvia es una variable aleatoria en el tiempo y se debe calcular como un valor que no debe ser superado durante un cierto porcentaje de tiempo dado. Viene dado por la fórmula 2.6.

$$a_R = \gamma_R L_{eq} \quad (2.6)$$

Se considera que la lluvia es de intensidad R solo en una parte del trayecto (L_{eq}). Para el cálculo de esta longitud, se utiliza la Figura 2.2.

Longitud equivalente ocupada por la lluvia en un vano de radioenlace

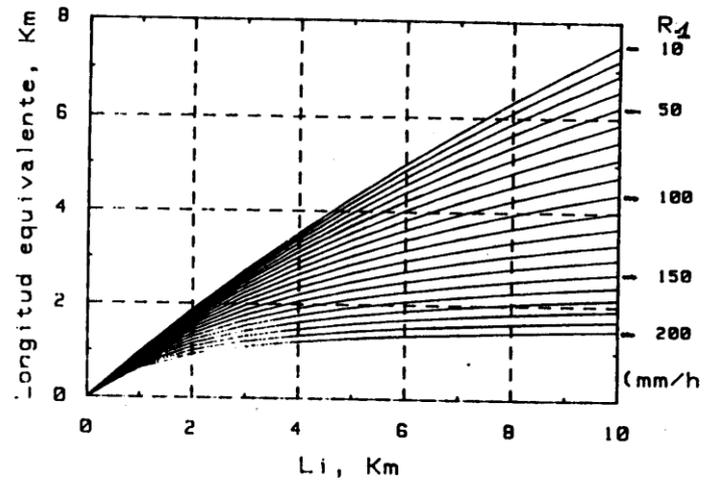
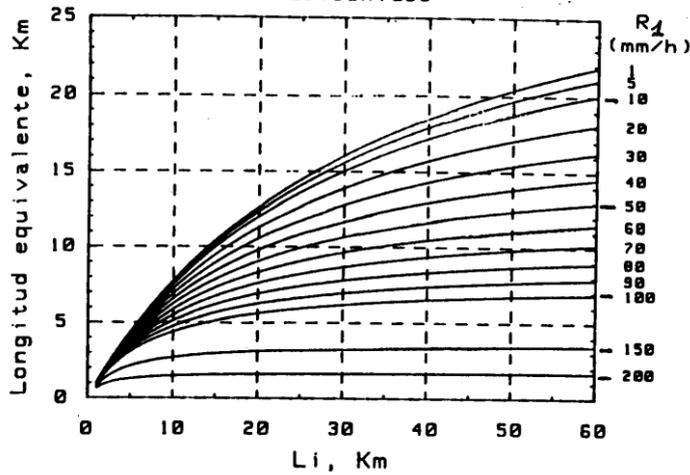


Figura 2.2: Gráficas para el cálculo de la longitud equivalente.

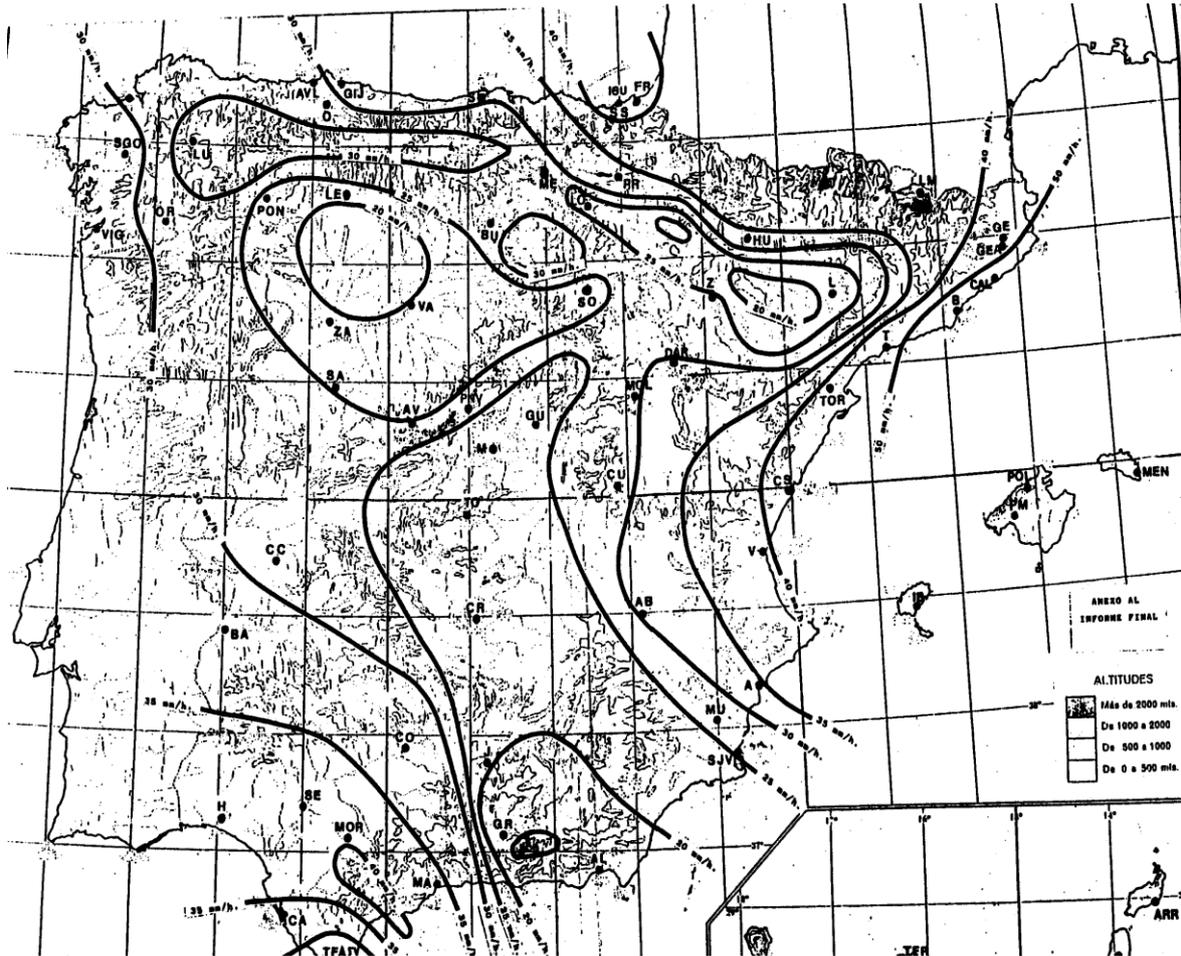
La atenuación específica de lluvia viene determinada por la ecuación 2.7.

$$\gamma_R = K * R^\alpha \quad (2.7)$$

donde K y α son valores que dependen de la frecuencia para las polarizaciones lineales y trayectos horizontales los cuales se calculan mediante la ecuación 2.8.

R es la intensidad de lluvia

Es necesario conocer las distribuciones de probabilidad de la intensidad de lluvia (R) superada durante el 0.01% del tiempo la zona geográfica en la que se quiera instalar el radioenlace.



Los parámetros K y α deben calcularse mediante las ecuaciones 2.8.

$$K = \left(\frac{1}{2}\right)[K_H + K_V + (K_H - K_V) * \cos^2\beta * \cos 2\tau] \quad (2.8)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{2K}\right)[K_H\alpha_H + K_V\alpha_V + (K_H\alpha_H - K_V\alpha_V) * \cos^2\beta * \cos 2\tau]$$

siendo β el ángulo de elevación del trayecto y τ el ángulo de inclinación del vector E respecto del plano horizontal. Los valores de K_H, K_V, α_H y α_V se dan en la Tabla 2.1 recomendada por el CCIR.

Frequency (GHz)	K_H	K_V	α_H	α_V
1	0.000 038 7	0.000 035 2	0.912	0.880
2	0.000 154	0.00 138	0.963	0.923
4	0.000 650	0.000 591	1.121	1.075
6	0.001 75	0.001 55	1.308	1.265
8	0.004 54	0.003 95	1.327	1.310
10	0.010 1	0.008 87	1.276	1.264
12	0.018 8	0.016 8	1.217	1.200
15	0.036 7	0.033 5	1.154	1.128
20	0.075 1	0.069 1	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.030
30	0.187	0.167	1.021	1.000
35	0.263	0.233	0.979	0.963
40	0.350	0.310	0.939	0.929
45	0.442	0.393	0.903	0.897
50	0.536	0.479	0.873	0.868
60	0.707	0.642	0.826	0.824
70	0.851	0.784	0.793	0.793
80	0.975	0.906	0.769	0.769
90	1.06	0.999	0.753	0.754
100	1.12	1.06	0.743	0.744
120	1.18	1.13	0.731	0.732
150	1.31	1.27	0.710	0.711
200	1.45	1.42	0.689	0.690
300	1.36	1.35	0.688	0.689
400	1.32	1.31	0.683	0.684

Tabla 2.1: Valores de K_H, K_V, α_H y α_V

2.1.4 Pérdidas en los radioenlaces de microondas

El balance de potencias del radioenlace se escribe en términos de ganancias de las antenas, pérdidas del espacio libre y pérdidas de propagación, conformadas por las pérdidas por gases y vapores atmosféricos y lluvias. También incluye pérdidas adicionales de los equipos del sistema de microondas que son causadas por los guías de onda, conectores, filtros y las antenas. Se expresa en decibelios.

$$\frac{P_R}{P_T} = -L_0 + G_T + G_R - L' \quad (dB) \quad (2.9)$$

P_R = Potencia en antena receptora.

P_T = Potencia en antena transmisora.

L_0 = Pérdidas en el espacio libre.

G_T = Ganancia de la antena transmisora.

G_R = Ganancia de la antena receptora.

L' = Pérdidas adicionales por gases, lluvias y equipos de microondas.

2.2 Modelo de tierra plana

Al hacer representaciones de algún perfil o trayectoria de la superficie de la tierra debe considerarse que la misma es esférica, dependiendo de la exactitud que se requiera en el análisis y por motivos de simplicidad suele despreciarse el radio de curvatura

terrestre, dando origen a lo que se conoce como modelo de tierra plana. Dicho modelo es óptimo para enlaces de microondas troposféricos de distancias inferiores a 15km.

2.3 Zonas de Fresnel

Una parte fundamental de los radioenlaces es saber si las antenas tienen visibilidad directa entre ellas o hay algún obstáculo en el trayecto y produce difracción en la onda transmitida.

Para ello, hay que definir la condición de visibilidad entre antenas, es decir, cuándo debe considerarse que hay visibilidad directa o cuándo hay un obstáculo que haga la difracción relevante en la propagación.

Supóngase la siguiente situación en la que dos antenas isótropas se encuentran a una distancia R.

Se definen las zonas de Fresnel como aquellos puntos del espacio que cumplen:

$$(r_1 + r_2) - R = n * \left(\frac{\lambda}{2}\right); \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

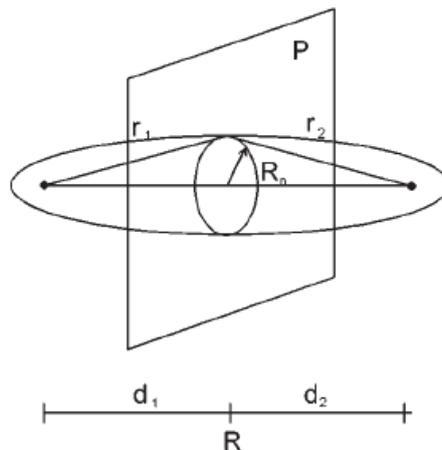


Figura 2.4: Zonas de Fresnel

Las zonas de Fresnel son elipsoides de revolución cuyo eje mayor tiene una longitud de

$$R + n * \left(\frac{\lambda}{2}\right); \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.11)$$

La intersección de las zonas de Fresnel con el plano P (punto donde se encuentra el obstáculo, Figura 2.4) son circunferencias cuyo radio puede calcularse para el caso que sea mucho menor que d1 y d2 (distancias desde las antenas hasta el obstáculo).

$$R_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.12)$$

El frente de onda propagado por la antena transmisora se desfasa a medida que se aleja el eje longitudinal de propagación diferenciando las llamadas zonas de Fresnel. Aplicando el principio de Huygens, el campo sobre la antena receptora puede formarse como la superposición de fuentes elementales de ondas esféricas situadas en el plano P, radiando cada una de estas fuentes con un desfase función de la distancia r_1 .

A partir de la definición de las zonas de Fresnel, los campos producidos por las fuentes equivalentes de Huygens situadas en la primera zona de Fresnel se sumarán en la antena receptora con una fase inferior a 180° , es decir, constructivamente. Las contribuciones de las fuentes situadas en las zonas 2 y 3 tienden a cancelarse mutuamente [CAR02].

Por tanto, el radio de la primera zona de Fresnel permite definir la condición de visibilidad entre antenas, de forma que mientras no exista un obstáculo dentro de la primera zona de Fresnel se considera que la trayectoria no ha sido obstruida. Por el contrario, cuando el obstáculo se encuentra dentro de la primera zona de Fresnel existirá una disminución apreciable en la potencia recibida, y se deberá tener en cuenta el efecto de la dispersión.

2.4 Umbral

El umbral (T_h) se define como el nivel de señal requerido en el receptor para que los errores en la recepción no superen la tasa de error de bit (BER) establecida.

2.5 Desvanecimientos

Desvanecimiento es un término que describe la rápida fluctuación de la amplitud y la fase de una señal de radio en un corto periodo de tiempo o durante el viaje de ésta en una distancia corta en relación a su longitud de onda.

2.5.1 Desvanecimiento plano y selectivo

El desvanecimiento selectivo ocurre cuando las condiciones atmosféricas desvían una transmisión hasta el punto que las señales alcanzan el receptor en trayectorias ligeramente diferentes. Estas trayectorias resultantes pueden originar interferencias y errores en los datos. El desvanecimiento selectivo se produce de forma independiente en cada canal y no afecta a otros canales de la transmisión de microondas (Figura 2.5). Por lo tanto se suelen proporcionar canales de recuperación para protegerse de este problema.

Si $B_s > B_c$, el canal se distorsiona, no conserva el espectro de la señal transmitida.

B_s , ancho de banda de la señal.

B_c , ancho de banda de coherencia del canal.

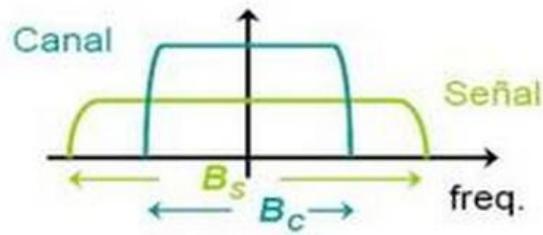


Figura 2.5: Desvanecimiento selectivo [WEB01]

El desvanecimiento plano se produce cuando el ancho de banda de coherencia del canal es mayor que el ancho de banda del canal (Figura 2.6). En este caso el cambio de amplitud y fase se pueden considerar más o menos constantes. Este desvanecimiento puede durar varias horas y la solución de canales alternativos no proporciona seguridad en este caso. El desvanecimiento plano tiene lugar durante la niebla y cuando el terreno circundante se encuentra muy húmedo. Estas condiciones cambian también las características eléctricas de la atmósfera. Una parte de la señal transmitida es refractada y no alcanza la antena receptora.

Si $B_s < B_c$, el canal conserva el espectro de la señal transmitida ya que trata todas las frecuencias por igual.

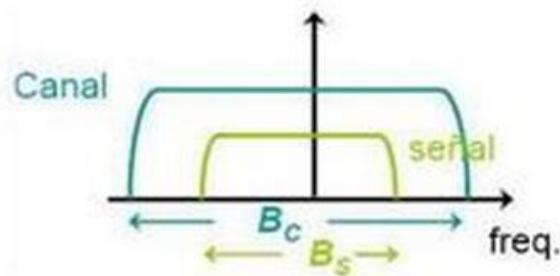


Figura 2.6: Desvanecimiento plano [WEB01]

2.5.2 Desvanecimiento multitrayecto

El desvanecimiento multitrayecto se produce cuando múltiples versiones de la señal transmitida llegan al receptor desplazadas una respecto de otra en términos de tiempo. Las fases aleatorias y las amplitudes de las diferentes componentes causan fluctuaciones en la intensidad de la señal, introduciendo desvanecimientos de pequeña escala, distorsión de señal o ambas. Este fenómeno se muestra gráficamente en la Figura 2.7.

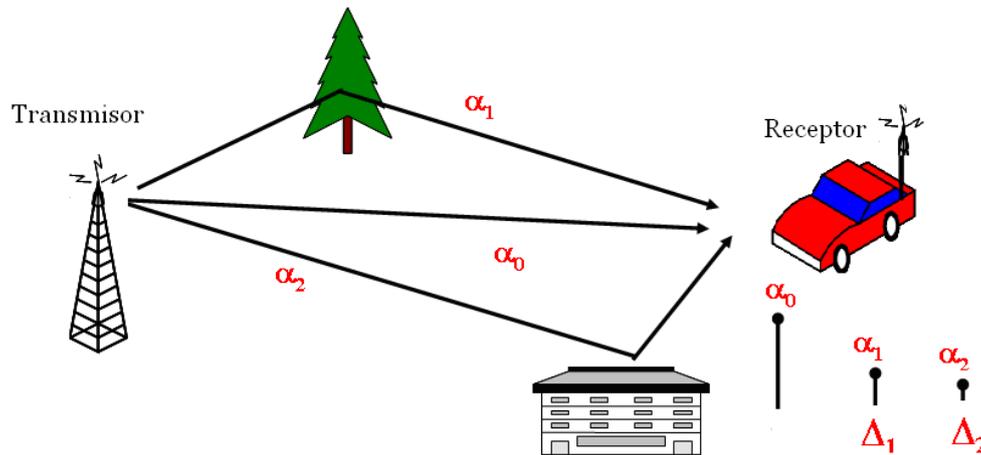


Figura 2.7: Desvanecimiento multirrayecto [WEB02]

2.6 Margen bruto de desvanecimiento

Margen bruto de desvanecimiento es la diferencia entre la potencia recibida y el umbral. (M_3)

$$M_3 = P_R(\text{dBm}) - T_h(\text{dBm}) \quad (2.13)$$

2.7 Calidad del radioenlace

La calidad de un radioenlace es dependiente del porcentaje de tiempo en el que la señal recibida podría encontrarse por debajo del umbral del receptor.

La propagación multirrayecto es muy influyente en el desvanecimiento a frecuencias inferiores de 10 GHz. A frecuencias superiores, los efectos de las precipitaciones son la causa determinante del desvanecimiento.

Como los eventos de errores que afectan a la indisponibilidad son relativamente largos (>10s) y el desvanecimiento multirrayecto es de breve duración (ms), se realizan por separado las evaluaciones de indisponibilidad y calidad de fidelidad.

Para la primera sólo se considera el efecto de la lluvia por encima de 10 GHz. Para el cálculo de la calidad de fidelidad se toman en cuenta las interrupciones breves debidas a ruido térmico, interferencias y distorsiones provocadas por desvanecimiento plano y selectivo, según la capacidad del enlace.

2.7.1 Indisponibilidad de los radioenlaces de microondas

2.7.1.1 Indisponibilidad por equipos

La fiabilidad es la capacidad de un componente, equipo o sistema de no fallar durante un periodo de tiempo. Existe una relación matemática entre fiabilidad de los componentes y el sistema.

La fiabilidad distingue 3 tipos o periodos de fallos:

- a) Fallos que ocurren al iniciarse el periodo de vida operativo del equipo y que suceden generalmente por defecto de fabricación, control de calidad o instalación
- b) Fallos debidos al desgaste y que dependen del mantenimiento.
- c) Fallos aleatorios que suceden al azar y que no depende de pruebas o del mantenimiento.

Los fallos aleatorios tienen una distribución uniforme. La inversa de la tasa de fallos aleatorios se denomina Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF), y se expresa en horas.

La mantenibilidad puede definirse como la probabilidad de volver a poner en marcha en un tiempo determinado un sistema que ha sufrido un fallo o interrupción. El tiempo de interrupción comprende el tiempo logístico de movilidad y el administrativo. Se denomina Tiempo Medio de Reparación (MTTR) indicado en horas.

La disponibilidad D se define como la probabilidad que el sistema se encuentre trabajando en forma satisfactoria y equivale a:

$$D = 1 - I$$

$$I = MTTR / (MTBF + MTTR) \quad (2.14)$$

MTBF es mucho mayor que MTTR por lo que la indisponibilidad I se puede expresar como:

$$I = MTTR / MTBF \quad (2.15)$$

2.7.1.2 Indisponibilidad por propagación

La indisponibilidad por propagación se puede definir como la pérdida de señal en el receptor por desvanecimientos o diversas causas originadas en el trayecto atravesado por la señal. Los desvanecimientos más habituales son los debidos a propagación multitrayecto.

La probabilidad de aparición de un desvanecimiento o la probabilidad de indisponibilidad viene determinada por la siguiente expresión:

$$P_{ind} = P_0 * 10^{-F/10} \quad (2.16)$$

P_0 = Factor de aparición de desvanecimiento.

F = Margen frente a desvanecimientos.

El factor P_0 , depende de la longitud del enlace, rugosidad del terreno, frecuencia y clima.

Dicho parámetro se puede calcular siguiendo tres métodos diferentes.

1) Método Morita-Makino

Éste calcula el factor de desvanecimiento de esta forma:

$$P_0 = (f/4)^{1.2} * Q * d^{3.5} \quad (2.17)$$

f: frecuencia en GHz

d: longitud del enlace (Km)

Q factor dado por:

$Q = 2,0 \cdot 10^{-9}$ para condiciones montañosas

$Q = 5,1 \cdot 10^{-9}$ para terrenos planos

$Q = 3,7 \cdot 10^{-7} \cdot h^{-0.5}$ para terrenos sobre agua. h altura promedio sobre el terreno en metros.

2) Método de Barnett-Vigants

Este método permite hallar el factor de desvanecimiento para el peor mes del año. Viene determinado por la siguiente expresión:

$$P_0 = a * b * 6 * 10^{-7} * f * d^3 \quad (2.18)$$

f = Frecuencia en MHz

d = Distancia en Km entre el transmisor y receptor.

b = Factor climático. Toma diferentes valores según la región (Tabla 2.2).

b	Región climática
4.0	Ecuatorial, regiones con alta temperatura y humedad
3.0	Desértica, fuertes variaciones térmicas desde el día y hasta la noche
2.0	Marítima, regiones de clima bastante seco
1.5	Templados, veranos lluviosos e inviernos secos
1.0	Templados, fuerte variación de temperatura durante el día
0.5	Regiones altas, bastante secas
0.25	Montañosas y secas
0.05	Polar. Bajas temperaturas y poca precipitación

Tabla 2.2: Factor climático (b) para diferentes regiones climáticas [LAN08].

a = Factor de rugosidad. Toma diferentes valores en función del tipo de terreno (Tabla 2.3).

a	Tipo de terreno
4	Terreno muy suave o agua

1	Terreno promedio o con alguna irregularidad
0.25	Terreno montañoso o muy rugoso

Tabla 2.3: Factor de rugosidad(a) para diferentes terrenos [LAN08].

3) Recomendación UIT-R P.530-7

Este método se utiliza para planificar radioenlaces de hasta 95 km de longitud. En ellos hay que tener en cuenta tres mecanismos de desvanecimiento en condiciones de cielo despejado, que son: dispersión del haz, desalineamiento de antena y propagación por trayectos múltiples. Estos son debidos a las capas refractivas de la atmósfera.

Otro mecanismo de desvanecimiento es el debido a irregularidades de densidad de iones y electrones que producen variaciones de amplitud y fase en la señal, pero a frecuencias inferiores a 40 GHz su efecto no es significativo.

El método que se muestra a continuación trata de predecir la distribución del desvanecimiento a una sola frecuencia para porcentajes de tiempo pequeños en el peor mes medio en cualquier parte del mundo. El método no utiliza el perfil del trayecto, y es posible utilizarlo para la planificación inicial o adquisición de licencias.

Para el cálculo del factor de aparición de desvanecimiento se plantea la siguiente fórmula:

$$P_0 = Kd^{3.2}(1 + |\varepsilon_p|)^{-0.97} * 10^{0.032f - 0.00085 h_L \%} \quad (2.19)$$

ε_p se define como el factor de inclinación del trayecto (mrad) y se calcula teniendo en cuenta la altura de las antenas (m) respecto del nivel del mar o respecto de una altura de referencia y la longitud del trayecto (km):

$$|\varepsilon_p| = |h_r - h_e|/d \quad (2.20)$$

h_L es la altura de la antena inferior.

Para la ubicación del radioenlace, se estima el factor geoclimático K para el mes más desfavorable medio.

Si se conocen datos de desvanecimiento de la zona geográfica, se puede estimar K a partir de ellos.

En caso contrario, si no se conocen los datos medidos para K, se puede estimar este factor (si se trata de un enlace a más de 100 metros de altitud respecto el nivel del mar) mediante la siguiente expresión:

$$K = 5 * 10^{-7} * 10^{-0.1(C_0 - CLat - CLon)} p_L^{1.5} \quad (2.21)$$

el valor del coeficiente C_0 viene dado en la Tabla 2.4 para tres rangos de alturas de la antena y tres tipos de terreno (plano, ondulado o montañoso). Dicha antena será la más baja del radioenlace, o bien la transmisora o bien la receptora.

Alturas de la antena más baja y tipo de terreno que atraviesa el enlace	C_0 (dB)
Antena de poca altura(0-400m)-Terreno plano: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja inferior a 400m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente planas.	0
Antena de poca altura(0-400m)-Terreno ondulado: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja inferior a 400m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente onduladas.	3.5
Antena de altura media(400-700m)-Terreno plano: Enlace sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja en la gama de 400-700 por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente planas.	2.5
Antena de altitud media(400-700m)-Terreno ondulado: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja en la gama de 400-700m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente onduladas.	6
Antena de gran altura(>700m)-Terreno plano: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja superior a 700m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente planas.	5.5
Antena de gran altura(>700m)-Terreno ondulado: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja superior a 700m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente montañosas.	8
Antena de gran altura(>700m)-Terreno montañoso: Enlaces sobre tierra o parcialmente sobre tierra, con una altura de la antena más baja superior a 700m por encima del nivel medio del mar, situados en zonas predominantemente montañosas.	10.5

Tabla 2.4: Valor del coeficiente C_0 según la altura de las antenas.

En caso de que el terreno se desconozca, se emplearán los siguientes valores del coeficiente C_0 a utilizar en la ecuación:

$C_0 = 1,7$ para la antena de menor altura en la gama de 0-400 m por encima del nivel medio del mar.

$C_0 = 4,2$ para la antena de menor altura en la gama de 400-700 m por encima del nivel medio del mar.

$C_0 = 8$ para la antena de menor altura situada a más de 700 m por encima del nivel medio del mar.

El coeficiente C_{Lat} de latitud ξ viene dado por:

$$C_{Lat} = 0 \quad (\text{dB}) \text{ para } \xi \leq 53^\circ \text{ N o } ^\circ \text{ S}$$

$$C_{Lat} = -53 + \xi \quad (\text{dB}) \text{ para } 53^\circ \text{ N o } ^\circ \text{ S} < \xi < 60^\circ \text{ N o } ^\circ \text{ S}$$

$$C_{Lat} = 7 \quad (\text{dB}) \text{ para } \xi \geq 60^\circ \text{ N o } ^\circ \text{ S}$$

Y el coeficiente de longitud C_{Lon}

$$C_{Lon} = 3 \quad (\text{dB}) \text{ para longitudes de Europa y África}$$

$C_{Lon} = -3$ (dB) para longitudes de América del Norte y América del Sur
 $C_{Lon} = 0$ (dB) para las demás longitudes

El factor p_L se define como la variable climática, es decir, el porcentaje de tiempo durante el cual, el gradiente de reflectividad en los cien metros de la atmósfera más cercanos a la tierra es menor que $-100N/Km$.

El valor de esta variable se estima a partir de las figuras 8 a 11 de la UIT-R P.453-10 [WEB04], correspondientes a los 4 meses representativos de las estaciones (febrero, mayo, agosto y noviembre). De entre ellas se escoge el valor más elevado de porcentaje de tiempo de excedencia del gradiente -100 unidades N/km y ese será el valor de la variable [WEB03].

2.7.2 Parámetros de calidad de error

El parámetro básico de calidad de error es la Tasa de error de bit (BER, Bit Error Rate). A partir de este término se establecen otros parámetros que establecen la calidad de error de las transmisiones digitales.

Hay que tener en cuenta que se debe medir dichos parámetros de calidad en el momento de disponibilidad del sistema.

Se explican a continuación los eventos de características de error para conexiones:

- Segundos con errores (ES, error second): Intervalo de un segundo en que uno o más bits tienen errores o durante el cual se detecta una pérdida de señal, o una señal de indicación de alarma (AIS).
- Segundo con muchos errores (SES, severely errored second): Intervalo de un segundo en que la tasa de errores en los bits (BER, bit error ratio) es $\geq 1 \cdot 10^{-3}$ o durante el cual se detecta una pérdida de señal, o una señal de indicación de alarma (AIS).
- Segundo sin errores (EFS, error Free Second): Periodo de 1 segundo en que no hay errores de bit.

A partir de estos términos se han definido los siguientes parámetros de calidad de error:

- Tasa de segundo con error (ESR, errored second ratio): Relación entre ES y el total de segundos de tiempo de disponibilidad durante un intervalo de medición fijo.
- Tasa de segundos con muchos errores (SESR, severely errored second ratio): Relación entre SES y el total de segundo de tiempo de disponibilidad durante un intervalo de medición fijo.

En caso de un enlace digital real de longitud L (Km), la recomendación UIT-R F.634 [WEB05] establece los siguientes objetivos de calidad:

$$ESR = \frac{L}{2500} * 0.0032$$

$$SESR = \frac{L}{2500} * 0.00054 \quad 280 < L < 2500km \quad (2.21)$$

$$SESR = 0.0005 + \frac{L}{2500} * 0.00004 \quad L > 2500km$$

Si L es menor a 280Km, los parámetros ESR y SESR consideran L=280Km.

2.7.3 Calidad de fidelidad de un radioenlace digital

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

Para hallar la calidad de fidelidad se calcula los porcentajes de tiempo en cada vano. La suma de los diferentes porcentajes, o en el caso de que solo haya un vano, el porcentaje de ese vano, se compara con las especificaciones de la UIT-R F.634.

Los porcentajes se evalúan separadamente para los desvanecimientos planos y selectivos.

Por lo que definimos la proporción de segundo con muchos errores como la suma de los porcentajes correspondientes a los desvanecimientos plano y selectivo.

$$P_{TT} = P_{TP} + P_{TS} \quad (2.22)$$

El cálculo del P_{TT} se realiza aplicando el método B presente en la recomendación UIT-R F.1093-1 [WEB06].

Para el cálculo de los porcentajes de tiempo, existen dos casos diferentes:

1) Radioenlaces digitales de baja capacidad (<34Mbit/s):

$$P_{TT} = P_{TP} = P_0 * 10^{M_3/10} * 100\% \quad (2.23)$$

M_3 , margen bruto de desvanecimiento

P_0 , factor de aparición de desvanecimiento

2) Radioenlaces digitales de capacidad media o alta:

En este caso se han de calcular los dos porcentajes (para desvanecimiento plano y selectivo). Siendo P_{TS} hallada mediante el método de la signatura, y finalmente P_{TT} con el método del margen de desvanecimiento

a) Método de la signatura

La probabilidad de interrupción de la transmisión debida a desvanecimiento selectivo, viene dada por el producto de la probabilidad de desvanecimiento multitrayecto η y la probabilidad condicional de que en estas condiciones haya interrupción:

$$p_s = \eta * p(o/\eta) \quad (2.24)$$

p_s = Probabilidad de interrupción de la transmisión.

η = Probabilidad de desvanecimiento multitrayecto.

$p(o/\eta)$ = Probabilidad de que en estas condiciones haya interrupción.

El porcentaje de tiempo P_{TS} es:

$$P_{TS} = p_s * 100\% \quad (2.25)$$

p_s = Probabilidad de interrupción de la transmisión.

Se han propuesto distintos métodos que proporcionan expresiones muy parecidas para el cálculo de la probabilidad condicional $p(o/\eta)$. La recomendación UIT-R F.1093-1 propone:

$$p(o/\eta) = \frac{C * Pb(1) * k < \tau^2 >}{T_s^2} \quad (2.26)$$

En donde:

$C * Pb(1)$: Toma el valor 2.16 en el Método B.

k : Constante de signatura normalizada, la cual puede obtenerse a partir de la curva de signatura del receptor. En la Tabla 2.5 figuran los valores de k típicos para receptores sin ecualización adaptativa. La utilización de ecualizadores transversales adaptativos en banda base mejora la calidad de funcionamiento del sistema de forma que las cifras para la zona de signatura normalizada k se reducen normalmente a 1/10, aproximadamente, de los valores señalados en la Tabla 2.5.

Método de Modulación	k	
	Teórica(Sin Ecualización Adaptativa)	Con ecualización
64QAM	15.4	1.54
16QAM	5.5	0.55
8PSK	7.0	0.7
4PSK	1.0	0.1

Tabla 2.5: Valor de la constante k .

$< \tau^2 >$: Momento de segundo orden de la distribución del retardo del eco.

Para los retardos con distribución exponencial:

$$< \tau^2 > = 2 * \tau_m^2 \quad (2.27)$$

Donde τ_m es el valor medio del retardo, que según la Recomendación UIT-R P.530-10 se define como:

$$\tau_m = \left(\frac{d}{50}\right)^{1.3} ns \quad (2.28)$$

Siendo d la longitud del trayecto en (Km).

T_s : Periodo del símbolo que depende del tipo de modulación “M” usada y la velocidad de transmisión V_b , y viene dada por:

$$(2.29)$$

$$T_S = \frac{\log_2(M)}{V_b}$$

η : Denominado factor de actividad multitrayecto y representa la fracción de tiempo (del mes más desfavorable) en que se produce desvanecimiento multitrayecto y viene dado según la Rec. UIT-R F.1093-1 para el método B como:

$$\eta = 1 - \exp[-0.2 * P_0^{3/4}] \quad (2.30)$$

Usando el valor $C * p_b(1) = 2.16$ (correspondiente al método B propuesto en la Rec. UIT-R F.1093-1). De esta manera se tiene que el porcentaje de tiempo para desvanecimiento selecto está dado por la expresión:

$$P_{TS} = 100 * \eta * 4.32 * k * (\tau_m / T_S)^2 \% \quad (2.31)$$

Cabe destacar que según se puede observar que P_{TS} no depende del margen bruto M_3 , por lo que no puede reducirse su valor aumentando la potencia. La disminución de P_{TS} solo se logra mediante la ecualización en FI o en BB, utilizando diversidad, o empleando una combinación de estas técnicas

b) Método del margen neto de desvanecimiento

La probabilidad total de interrupción P_{TT} puede escribirse en términos de un margen efectivo o neto de desvanecimiento M_e que es un valor teórico elegido de forma que P_{TT} pueda expresarse mediante una ley similar a la del desvanecimiento plano:

$$P_{TT} = P_0 * 10^{-M_e/10} \quad (2.32)$$

La expresión de M_e es la siguiente:

$$M_e (dB) = M_3 - 10 \log \left(1 + \frac{P_{TS}}{P_0} * 10^{M_3/10} \right) \quad (2.33)$$

Donde M_3 es el margen bruto de desvanecimiento y tanto P_0 como P_{TS} están dadas en forma porcentual [FER08].

2.8 Codificación y modulación adaptativa (ACM)

ACM funciona de la siguiente manera. Suponiendo un sistema configurado para 128 QAM con capacidad de 170 Mbps a través de un canal de 28MHz, cuando en el receptor el Bit Error Rate (BER) alcanza un umbral determinado, el sistema cambia a 64QAM y por tanto la velocidad se reduce a 140Mbps. Se trata de una transición sin errores, prácticamente instantánea. El sistema continúa funcionando en 64QAM hasta que la condición de desvanecimiento se intensifica o desaparece. Si el desvanecimiento es más intenso, la modulación se cambia al anterior nivel, que en este caso es 32 QAM. Por otro lado, si las condiciones ambientales mejoran y por tanto el BER disminuye, la modulación pasa al siguiente escalón en el conjunto de niveles, en este caso sería 128QAM y así sucesivamente, de escalón a escalón.

La conmutación continúa de forma automática y tan rápidamente como sea necesario, y en caso de condiciones extremas, puede llegar a convertirse en una modulación QPSK.

2.8.1 Scripts ACM Radio

Un Script de radio ACM se construye de un conjunto de perfiles. Cada perfil está definido por una orden de modulación (QAM) y velocidad de codificación y define la capacidad del perfil (bps). Cuando se activa una secuencia de comandos de ACM, el sistema elige automáticamente qué perfil utilizar de acuerdo a las condiciones de desvanecimiento del canal.

El perfil de ACM del transmisor puede ser diferente del perfil ACM del receptor. El script ACM del transmisor está determinado por el error cuadrático medio del receptor (MSE). El receptor es el que inicia un perfil ACM tanto para aumentar la modulación como para disminuirla.

Cuando MSE mejora por encima de un umbral predefinido, el receptor genera una solicitud al transmisor para aumentar su perfil, en cambio si el MSE se encuentra por debajo de un umbral predefinido, el receptor genera una solicitud al transmisor para que disminuya su perfil.

Los perfiles ACM se aumentan o disminuyen en una operación sin errores, sin afectar al tráfico.

Los scripts ACM pueden ser activados en dos modos diferentes:

- **Modo fijo**

En este modo el usuario puede seleccionar el perfil específico de todos los perfiles disponibles en la secuencia de comandos. El perfil seleccionado es el único perfil que será válido, y el motor de ACM se verá obligado a estar inactivo.

Este modo se puede seleccionar sin una licencia de ACM.

- **Modo adaptativo**

En este modo, el motor de ACM está funcionando, lo que significa que la radio adapta su perfil de acuerdo a las condiciones de desvanecimiento del canal. El modo adaptativo requiere una licencia de ACM.

2.8.2 ACM con potencia de transmisión adaptativa

Al planificar enlaces de radio basados en la utilización de ACM, el planificador de radio intenta aplicar la menor potencia de transmisión que llevará a cabo de manera satisfactoria en el más alto nivel de modulación. Durante condiciones de desvanecimiento que requieren modulación, la mayoría de los sistemas de radio no pueden aumentar la potencia de transmisión para compensar la degradación de la señal, lo que acarrea un desvanecimiento más profundo y por tanto una reducción mayor de la capacidad.

Con la potencia de transmisión adaptativa se evitarían estos efectos.

2.8.3 XPIC

La cancelación de interferencia por polarización cruzada es una de las mejores maneras para duplicar la eficiencia espectral. El uso de un equipo de radio de doble polarización sobre un canal de frecuencias único, transmite dos ondas portadoras sobre la misma frecuencia, pero utilizando doble polarización. Pero hay que tener en cuenta que las antenas típicas no pueden aislar completamente las dos polarizaciones. Además, los efectos de propagación, como la lluvia pueden causar rotación de la polarización haciendo que la interferencia de polarización cruzada sea inevitable.

Por tanto los XPIC son dispositivos que atenúan el efecto del acoplamiento cruzado de polarización, de tal manera que el canal pueda soportar el doble de capacidad de transmisión dentro de un único canal de frecuencias.

El nivel de interferencia se conoce como discriminación por polarización cruzada (XPD). Mientras que los sistemas de eficiencia espectral más bajos (con requisitos de baja SNR como QPSK) pueden tolerar fácilmente dicha interferencia, esquemas de modulación más altas no pueden y requieren XPIC.

XPIC incluye un mecanismo de recuperación automático que asegura que si una portadora falla, la otra portadora no se verá afectada.

Este mecanismo también se asegura de que cuando se borra el fallo, las dos portadoras estarán operativas.

2.8.4 Implementación de XPIC

El mecanismo XPIC utiliza las señales recibidas de los módems V y H para extraer las señales V y H y cancelar la interferencia de polarización cruzada debido a la fuga de señal física entre polarizaciones V y H.

Las señales que intervienen en este proceso vienen determinadas en la Figura 2.8.

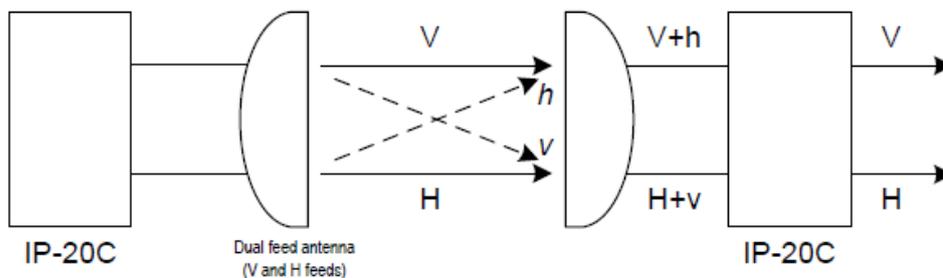


Figura 2.8: Señales originadas por la polarización cruzada

Se supone utilizadas antenas de doble polarización.

La señal $H+v$ es la combinación de la señal deseada H (horizontal) y la señal interferente V (en minúsculas para indicar que es la interferente).

Lo mismo sucede con la señal de recepción vertical $(V)=V+h$.

El mecanismo XPIC utiliza ambas señales recibidas y las manipula para generar los datos deseados.

En la Figura 2.9 se muestra esquemáticamente el mecanismo XPIC.

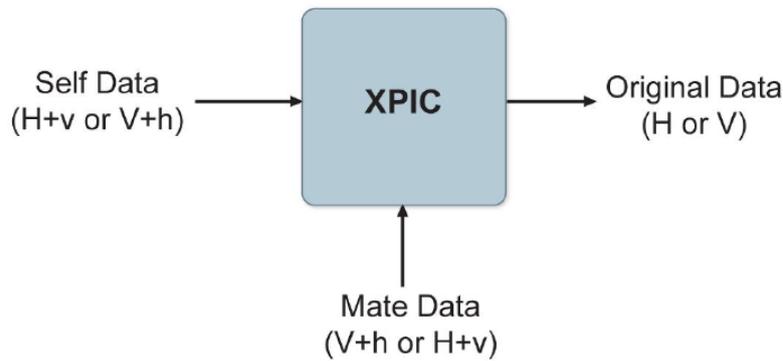


Figura 2.9: Mecanismo XPIC

2.8.5 Mecanismo de recuperación XPIC

El mecanismo de recuperación tiene como propósito salvar la mitad de la capacidad del enlace durante un fallo del equipo.

El mecanismo de XPIC se basa en la cancelación de la señal y asume que ambas señales transmitidas son recibidas (con un grado de separación de polaridad). Si se da el caso del fallo de una portadora, la interferencia de la otra portadora degradará fuertemente el enlace de la polarización fallida. En esta situación, el XRSM intervendrá para apagar el transmisor interferente.

El mecanismo funciona de la siguiente manera:

- El mecanismo de recuperación tiene lugar cuando $SNR \sim 10dB$.

- La primera medida tomada por el mecanismo de recuperación es “silenciar” al transmisor remoto defectuoso, eliminando de esta manera la señal perturbadora y salvaguardando el enlace en funcionamiento.

- Después de esto, el mecanismo intenta a intervalos recuperar el enlace caído. Para ello, realiza lo siguiente:

- El transmisor remoto se escucha por un breve periodo de tiempo

- El mecanismo de recuperación comprueba si el enlace se ha recuperado. Si no, vuelve a silenciar el transmisor.

- Esta acción se repite en intervalos exponencialmente más largos. Esta es la manera de restaurar rápidamente ambos enlaces en caso de un breve desvanecimiento del canal, sin afectar seriamente el funcionamiento.

- El número de intentos de recuperación es configurable por el usuario, con un valor por defecto de 8. Si el sistema no recupera el enlace fallido tras el número de intentos definidos, el transmisor se silencia permanentemente, el proceso de recuperación se interrumpe y el usuario tiene que llevar a cabo el mantenimiento.

Cada intento de recuperación originará tráfico que se sumará a la información transmitida por un breve instante de tiempo.

Todos los intervalos de tiempo mencionados anteriormente (tiempo de intento de recuperación, el tiempo inicial entre los intentos, factor de multiplicador para el tiempo de intento, el número de reintentos) pueden ser configurados por el usuario, pero se recomienda utilizar los valores por defecto.

El mecanismo de recuperación XPIC está activado por defecto, pero puede desactivarse por parte del usuario.

3. SELECCIÓN DEL RADIOENLACE

3.1 Descripción del radioenlace

El radioenlace que se va a implementar, como se ha comentado en la introducción, trata de comunicar el hospital de Estella con el silo que se encuentra en el otro extremo de la ciudad, a partir del cual se transmitirán los datos mediante fibra óptica hasta Pamplona.

Este proyecto únicamente se centra en la parte de radio del enlace que incluye los equipos de radio y antenas situados en la azotea del hospital y en el silo.

En la Figura 3.1 se muestra la ubicación de ambos emplazamientos.

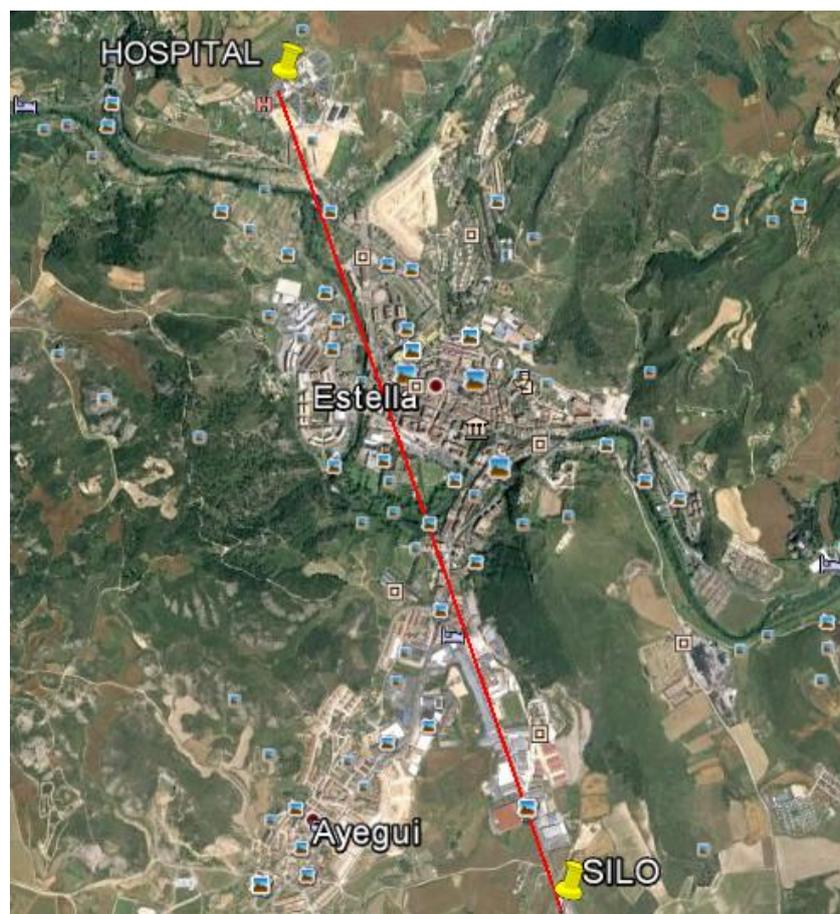


Figura 3.1: Ubicación de los equipos radio.

El hospital García Orcoyen de Estella (ver Figura 3.2) se trata de un edificio de cuatro plantas situado en la calle Santa Soria 22. Las coordenadas de su ubicación son: 42 41 00.60 N, 002 02 21.23 W.



Figura 3.2: Hospital García Orcoyen de Estella

En él, el equipo de radio y la antena se van a situar exactamente encima de una chimenea (remarcada con rojo en la Figura 3.3), a unos 13 metros de altura respecto del suelo.

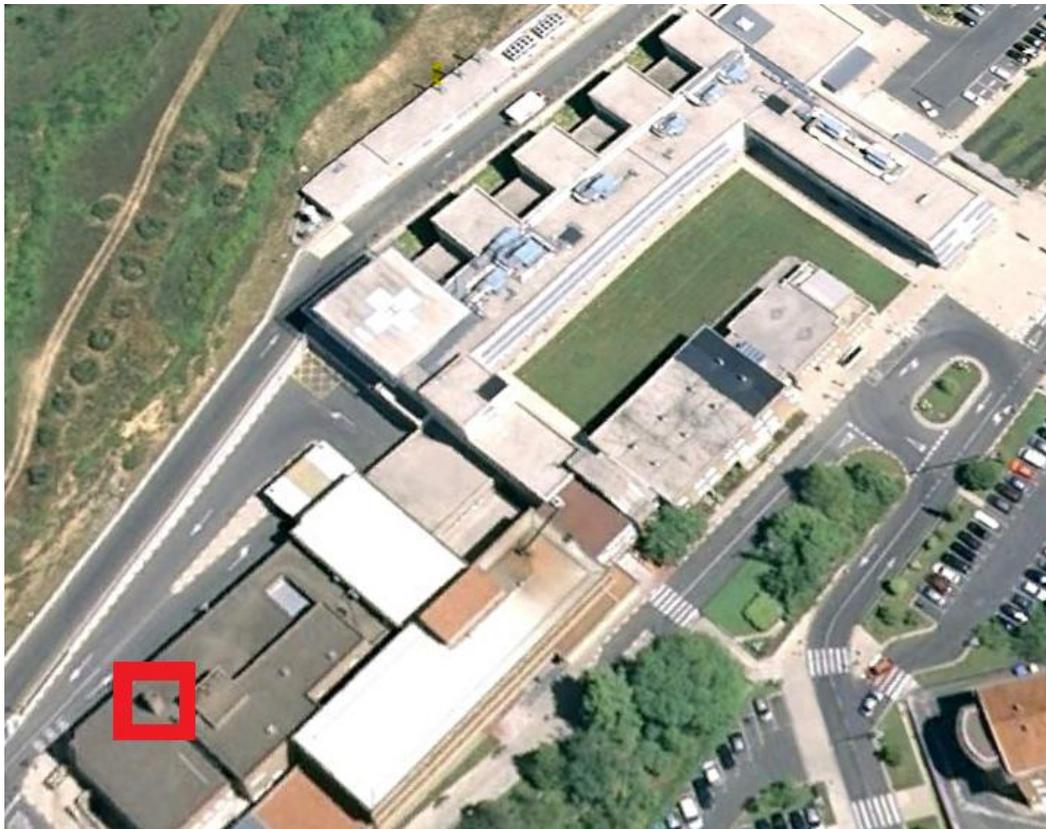


Figura 3.3: Ubicación del equipo radio en el hospital.

El silo se trata de una antigua edificación utilizada para guardar grano. Está situada en el polígono industrial Merkatondoa, en la carretera de entrada a Estella. Las coordenadas de su ubicación son: 42 39 13.51N, 002 01 38.2W

El edificio es de unos 27 metros de altura. En la parte superior posee dos terrazas exteriores.

El equipo de radio y la antena se van a situar en la parte más interna de la superficie exterior de la segunda planta pegada a la pared vertical (flecha roja Figura 3.4 y Figura3.5).

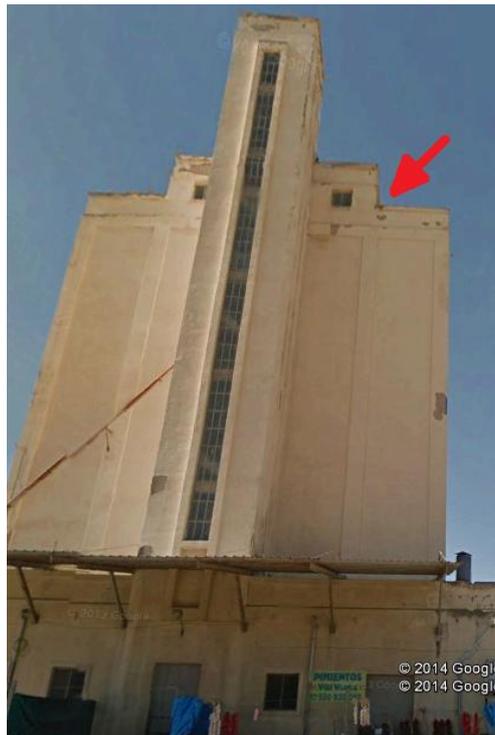


Figura 3.4: Ubicación del equipo radio en el Silo.



Figura 3.5: *Terraza del Silo.*

Se trata de un punto estratégico ya que tiene visibilidad directa con el hospital García Orcoyen y en la recepción, el rayo reflejado es difractado por la propia arista que forma la primera planta del silo. De esta manera sólo se recibe el rayo directo.

Se va a utilizar el programa Google Earth para una primera comprobación de los parámetros básicos del enlace. Introduciendo las coordenadas y ubicando los equipos de radio, se obtiene la longitud del enlace y el perfil topográfico que nos corrobora la condición de visibilidad directa (Figura 3.6).

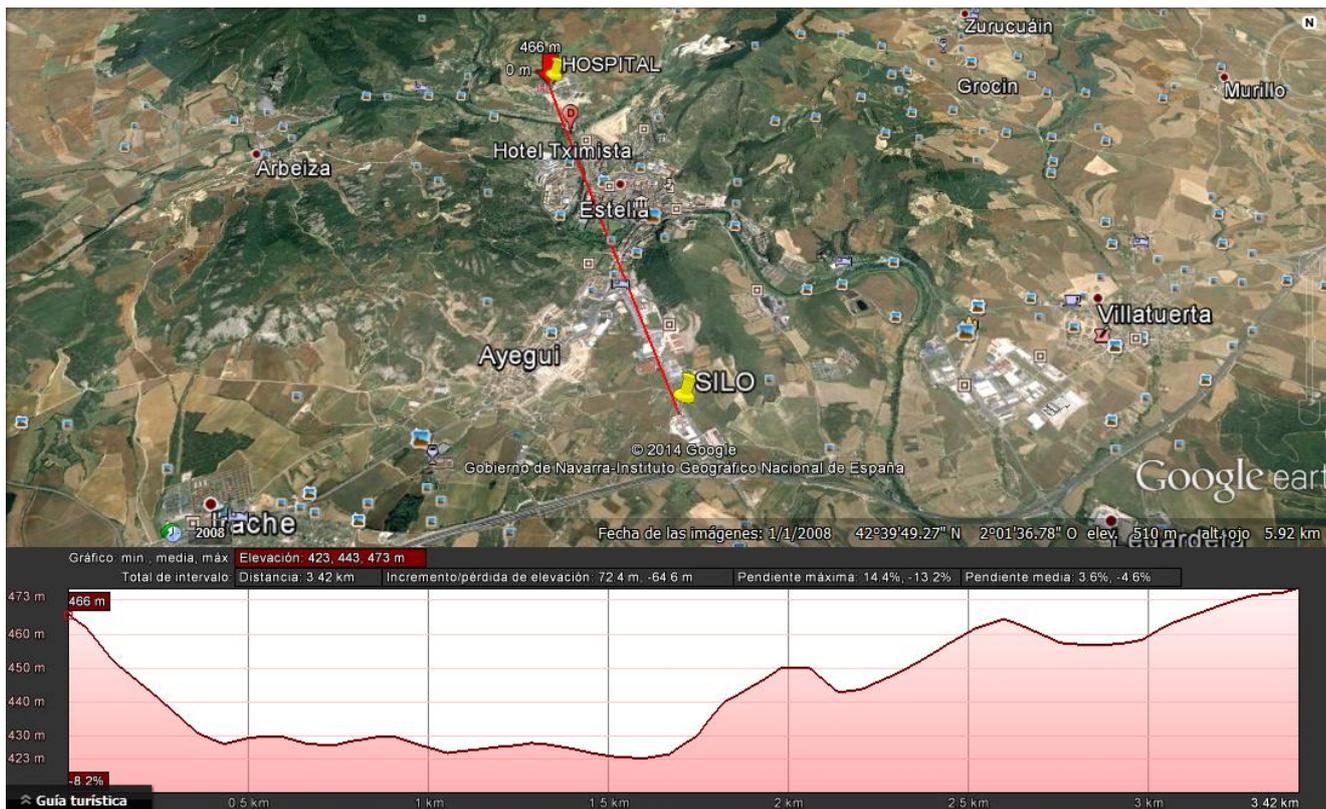


Figura 3.6: Perfil topográfico GoogleEarth

Se observa que la longitud del radioenlace tomado por GoogleEarth es 3.42 km, pero hay que suponer que las medidas no son exactas, por lo que se corrobora que la longitud es 3.45km. Lo que indica que es un enlace de corta distancia. En el perfil no se refleja la existencia de posibles obstáculos que puedan impedir la transmisión, pero como ya se ha mencionado, las antenas están a cierta altura por encima del nivel del suelo por estar en los edificios mencionados anteriormente. De esta manera se puede decir que hay visibilidad directa ya que con esa altura se pueden evitar ciertos obstáculos no reflejados en el perfil como suelen ser árboles y algún edificio cercano.

La finalidad del radioenlace es lograr la transmisión de datos a 1Gbps y con una modulación de 2048QAM. Para ello, se van a utilizar unos equipos de radio que se explicarán en apartados posteriores, los cuales permiten la transmisión simultánea de una onda en polarización vertical y otra en polarización horizontal. Se trata de flujos totalmente independientes, aunque se pueda producir cierta interferencia entre ellos (XPD).

Cada uno de los flujos de información alcanza una velocidad de 500Mbps, por lo que con dos flujos transmitiéndose al mismo tiempo se puede conseguir el objetivo de transmitir 1G.

Esta velocidad sólo se podrá alcanzar en condiciones meteorológicas buenas, ya que de lo contrario, los equipos de radio tienen la capacidad de adaptar el tipo de modulación según las pérdidas que esté sufriendo el enlace en ese momento y con ello la velocidad y capacidad del mismo. Pero de todas las características y prestaciones de los equipos de radio y antenas se hablará posteriormente.

3.2 Banda de frecuencias a utilizar

Debido a que se quiere la máxima capacidad posible y una modulación del enlace de 2048QAM se ha elegido un ancho de banda de 56MHz

La banda de frecuencias en la que se debe trabajar, es dependiente de la longitud del vano.

La Tabla 3.1 obtenida de [MIN09] muestra la relación entre la longitud y la frecuencia a utilizar, para dos casos diferentes:

Baja capacidad (Canalización < 14 MHz)	
0 - 10 km	Bandas de $f \geq 23$ GHz
5-15 km	Banda de 18 GHz
10 - 20 km	Banda de 15 GHz
más de 20 km	Banda de 10 GHz

Alta capacidad (Canalización > 14 MHz)	
0 - 5 km	Bandas de $f \geq 26$ GHz
5 - 15 km	Bandas de 23 y 18 GHz
15 - 35 km	Bandas de 15 y 13 GHz
más de 35 km	Bandas de $f < 13$ GHz

Tabla 3.1: Tipos de enlaces y frecuencias a utilizar.

En el caso del vano de Estella, se trata de un enlace de alta capacidad por lo que se tendrá en cuenta la parte de la Tabla 3.1, “Alta capacidad”.

El radioenlace tiene una longitud inferior a 5 Km. por lo que la frecuencia a la que debemos trabajar debe ser mayor o igual a 26GHz.

El equipo de radio que se ha escogido y se describirá en el siguiente apartado, trabaja a diferentes bandas de frecuencias como puede ser la de 26GHz, 28GHz, 31GHz, 32GHz, 38GHz y 42GHz.

Se debe comprobar si la banda de frecuencias seleccionada está libre en el espectro de frecuencias. Para ello existen dos maneras:

- 1) El Ministerio de Industria ofrece un programa descargable llamado Semibanda. Se trata de un programa muy sencillo que tiene un interfaz como la Figura 3.7:



Figura 3.7: Captura del programa Semibanda.

Se colocan las coordenadas correspondientes a los emplazamientos que conforman el radioenlace, el siguiente paso es poner la frecuencia que queremos comprobar, y por último darle a consultar.

El resultado nos indicará qué semibanda de transmisión es la adecuada para el emplazamiento consultado:

- “BAJA”: Indica que desde el emplazamiento, se debe transmitir en la parte BAJA de la banda de frecuencias.
- “ALTA”: Indica que desde el emplazamiento, se debe transmitir en la parte ALTA de la banda de frecuencias.
- “INDIFERENTE”: Indica que desde el emplazamiento y la banda consultada no hay establecida ninguna semibanda de transmisión, a priori se podría elegir cualquiera de las dos semibandas.
- “A DETERMINAR”: No se puede determinar a priori una semibanda para el emplazamiento y la banda de frecuencias solicitado, depende del estudio de compatibilidad radioeléctrica.

Como se observa en la Figura 3.7 donde las coordenadas son las correspondientes al hospital de Estella y el Silo, el resultado es “INDIFERENTE” por lo que de entrada no hay problema para utilizar esta frecuencia.

No obstante el resultado es orientativo y se utiliza para agilizar la tramitación de los expedientes y solicitar los emplazamientos en la semibanda adecuada.

2) El Ministerio de Industria saca cada nueve meses el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias que muestra qué bandas están libres de manera oficial.

La Tabla 3.2 [MIN14] muestra un fragmento de dicho documento en el que se muestra que para una frecuencia de 26GHz y un ancho de banda de 56GHz el canal 5 y 5' entre otros está disponible, lo que confirma el resultado obtenido por Semibanda.

Se escoge el canal 5 y 5' que corresponden a las frecuencias 24801 MHz y 25809 MHz correspondientemente [WEB 07].

Canalización (MHz)	Canales disponibles
112	3/3' 8/8'
56	5/5'-7/7' 11/11' ¹ 15/15'-16/16'
28	9/9'-15/15' 20/20' 21/21'-22/22' ¹ 29/29'-32/32'
14	17/17'-30/30' 36/36' 39/39'-40/40' 41/41'-43/43' ¹ 44/44'-45/45' 57/57'-64/64'
7	33/33'-60/60' 70/70'-72/72' 77/77'-81/81' 82/82'-85/85' ¹ 86/86'-90/90' 113/113'-128/128'
3,5	65/65'-120/120' 138/138'-144/144' 153/153'-162/162' 163/163'-170/170' ¹ 171/171'-180/180' 225/225'-256/256'

Tabla 3.2: Canales disponibles según el ancho de banda para la banda de 26GHz.

3.3 Equipos y prestaciones

El equipo de radio que se ha seleccionado en cada uno de los emplazamientos del radioenlace es el FibeAir IP-20C.

Ceragon es la empresa encargada de fabricar y distribuir estos equipos cuyas características principales se describirán a continuación.



Figura 3.8: FibeAir IP-20C.

IP-20C (ver Figura 3.8) está diseñado para soportar diversas configuraciones, como son:

- 2 x Multicore 2+0 SP/DP

En la configuración de polarización simple (SP), los equipos IP-20C se conectan a la antena utilizando un splitter RFU-C en cuyos lados tiene dos splitter que conectan con los equipos Ceragon.

En la configuración de doble polarización (DP), los equipos IP-20C se combinan mediante un splitter que a su vez está conectado a la antena mediante un OMT.

- MultiCore 2+2 SP/DP HBS (High-sensitive mode Single polarization)

En la configuración de polarización simple (SP), los equipos IP-20C se conectan a la antena mediante un acoplador dual y un splitter.

En configuración de doble polarización (DP), es el mismo caso que en SP pero sustituyendo el splitter por un OMT.

- 4x4 LoS MIMO

Esta configuración usa dos equipos IP-20C, cada una usa doble polarización, con los cuatro canales de radio usando la misma frecuencia. Cada equipo se conecta con su correspondiente antena usando un OMT.

- MultiCore 2+0 polarización Simple/Doble

En este proyecto, los equipos de radio van a tener la configuración MultiCore 2+0 Doble Polarización de montaje directo. El equipo radio se conecta con la antena mediante un OMT como se muestra en la Figura 3.9.



Figura 3.9: Configuración MultiCore 2+0 Doble Polarización.

Para una doble polarización se usa un OMT de tal manera que se combinan ambas señales para que se puedan transmitir en dos polarizaciones diferentes. El OMT aúna ambas señales pero desfasadas entre ellas 90° dando lugar a las dos polarizaciones.

El OMT presenta los puertos de la Figura 3.10 en la parte que da al equipo y en la parte que da a la antena.

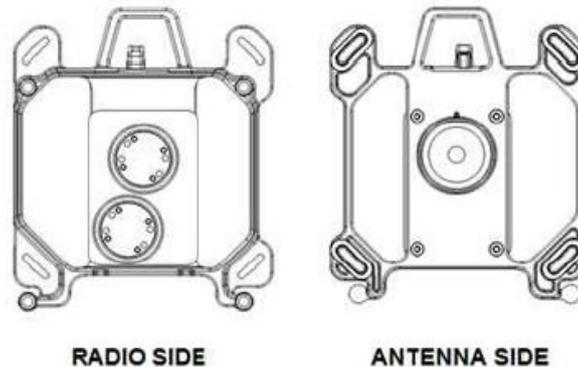


Figura 3.10: Puertos OMT.

Se trata de un equipo totalmente exterior y se coloca en la parte trasera de la antena. La Figura 3.11 muestra los puertos e interfaces del equipo.

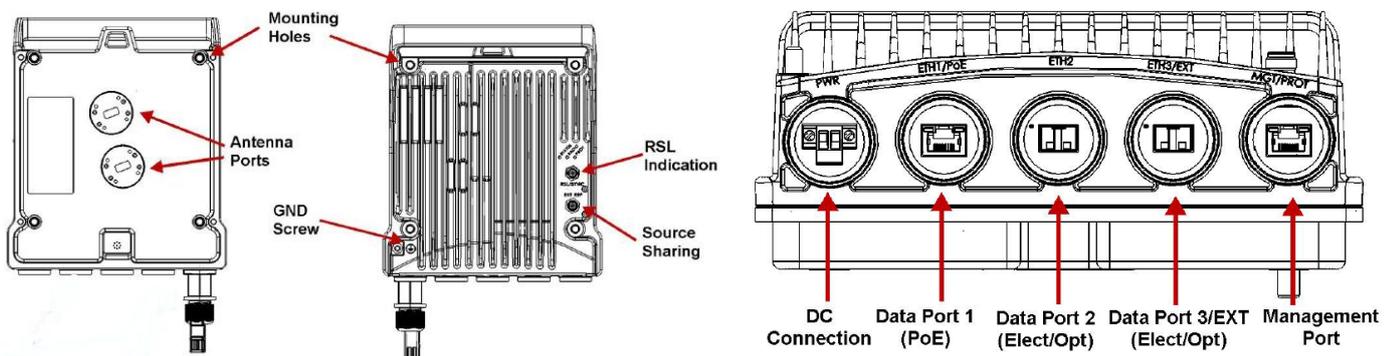


Figura 3.11: Puerto e interfaces del equipo radio.

- Data Port 1 for GbE traffic:
Eléctrico: 10/100/1000Base-T. Supports PoE.
- Data Port 2 for GbE traffic:
Eléctrico: 10/100/1000Base-T
Óptico: 1000Base-X
- Data Port 3/EXT
Eléctrico: 10/100/1000Base-T
Óptico: 1000Base-X

IP-20C emplea una tecnología para reducir la latencia producida en alta capacidad y aumentar la capacidad de transmisión. Algunas de las técnicas utilizadas para ello son MIMO y “Header De-Duplication”.

Línea-de-vista(LoS) Multiple Input Multiple Output (MIMO), es una tecnología muy reciente en microondas. En ella se combinan la arquitectura “MultiCore” (Multinúcleo) y la redundancia espacial de tal manera que permite a los operadores duplicar o cuadruplicar la capacidad sobre un único canal frecuencial según se use la configuración MIMO 2x2 ó 4x4.

En el presente proyecto no se hace uso de la tecnología MIMO ya que no hay redundancia espacial. Únicamente se colocará un equipo en el hospital y otro en el silo.

Otra opción que ofrece IP-20C es “Header De-Duplication”, que permite reducir la latencia, aumentar la capacidad y proveer a los operadores eficiencia espectral. La técnica consiste en que “Header De-Duplication” identifica los flujos de tráfico y reemplaza las cabeceras por un identificador de flujo. Esto se hace ya que las cabeceras de la tramas hoy en día usan una pila de protocolos que contienen una cantidad considerable de información redundante.

Otra de las características que posee el equipo de Ceragon es el “Frame Cut-Through” que permite que las tramas de alta prioridad se transmitan antes que las de baja prioridad aun cuando estas últimas se hayan empezado a transmitir. Una vez que se transmiten las tramas de alta prioridad, la transmisión de las tramas de menor prioridad se reanuda sin pérdida de capacidad y no requieren retransmisión. Consiste en partir los paquetes grandes para introducir entre medio, paquetes pequeños y de alta prioridad como podría ser la voz.

IP-20C soporta modulación y codificación adaptativa (ACM), que como se ha explicado proporciona ajuste dinámico de la modulación en función de las condiciones de desvanecimiento que se estén dando en ese instante. El equipo utiliza 11 perfiles posibles de modulación como se muestra en la Tabla 3.3.

Perfil de modulación	Modulación
Perfil 0	QPSK
Perfil 1	8 PSK
Perfil 2	16 QAM
Perfil 3	32 QAM
Perfil 4	64 QAM
Perfil 5	128 QAM
Perfil 6	256 QAM
Perfil 7	512 QAM
Perfil 8	1024 QAM (Fuerte FEC)
Perfil 9	1024 QAM (Leve FEC)
Perfil 10	2048 QAM

Tabla 3.3: Niveles de modulación.

Los beneficios que proporcionan la codificación y modulación adaptativa son:

- Maximizar el uso del espectro
- Aumentar la capacidad sobre un ancho de banda dado
- 11 perfiles de modulación/codificación (3dB de diferencia para que se pase de un nivel a otro).
- Cambios de codificación/modulación sin errores.
- Potencia de transmisión adaptativa en cada perfil.
- Mecanismo de calidad de servicio que no permite que el tráfico de alta prioridad se vea afectado en caso de caída del enlace.

IP-20C también soporta la cancelación de interferencia por polarización cruzada (XPIC).XPIC permite duplicar la capacidad del enlace con una sola unidad de IP-20C montada directamente sobre la antena. El doble núcleo IP-20C utiliza la doble polarización sobre un canal de frecuencia única, transmitiendo así dos portadoras separadas sobre la misma frecuencia, pero con polaridad alterna.

3.4 ANTENAS

El equipo IP-20C se puede montar directamente sobre antenas Andrew (VHLP), RFS, Xian Putian(WTG), Radio Wave, GD y Shenglu.

Se ha seleccionado una antena VHLP3-26 que trabaja entre 24.250-26.5 GHz. Transmitirá la señal resultante de la combinación de ambos flujos de información (en cada una de las polarizaciones) mediante un OMT.



Figura 3.3.5: Antena VHLP3-26.

4. CÁLCULO Y ESTUDIO DEL RADIOENLACE

4.1 Introducción a SIRENET

La viabilidad y parámetros del radioenlace se calculan con el programa de simulación SIRENET.

SIRENET (SIMulation of RAdoElectric NETworks), es una aplicación informática que facilita la planificación y gestión de redes radio.

El programa se encuentra estructurado en estudios que proporcionan distinta funcionalidad. Los diferentes estudios pueden ser desde un simple análisis entre dos puntos hasta la asignación automática de frecuencias en una red compuesta por cientos de Estaciones Base o la comprobación del nivel de interferencia producida en todos los puntos del área cubierta por dicha red. En este caso se ha realizado un análisis entre dos puntos como se ve en la Figura 4.1.

Los estudios hacen uso de las entidades de base de datos que son elementos que pueden formar parte de un estudio como por ejemplo son el receptor, transmisor, antena etc.

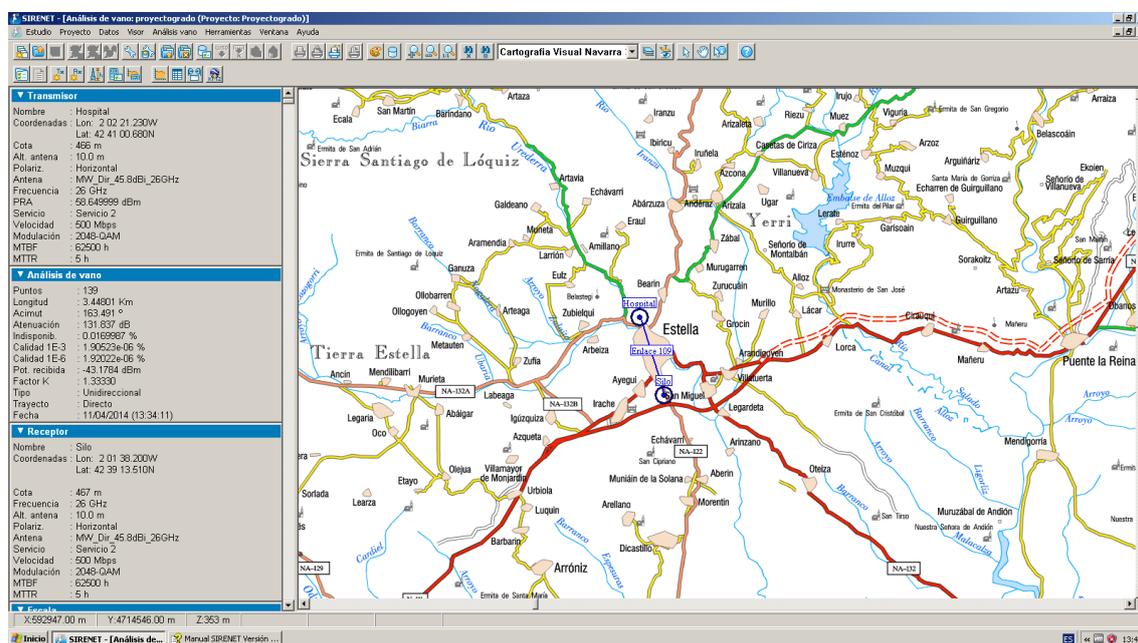


Figura 4.1: Captura SIRENET

SIRENET es una herramienta de planificación que permite trabajar con todo tipo de servicios radioeléctricos y tecnologías, siendo un programa idóneo para el diseño de redes de radiodifusión, servicios móviles, servicio fijo, etc.

Los resultados de los estudios realizados pueden ser almacenados, impresos y exportados.

Todos los estudios tienen un conjunto de características y parámetros comunes:

Dentro de la ficha “Estudio”:

- Nombre: Nombre del estudio.
- Servicio: Servicio radioeléctrico de la red que se está planificando. Este parámetro es importante ya que determinados cálculos de la aplicación se harán de forma distinta en función del mismo.
- Proyecto: Los estudios se pueden agrupan en proyectos. Esto facilita la gestión de la información en caso de que se tenga un gran número de estudios.

En lo referente a la cartografía utilizada por el programa, se puede seleccionar el sistema de coordenadas que se va a emplear en el estudio. Al hacer esto, las capas cartográficas que se encuentran referenciadas con ese sistema de coordenadas se guardan automáticamente y son sobre las que se trabajará. En cada estudio únicamente se podrá usar un solo sistema de coordenadas, por lo que no se podrán usar capas cartográficas que no estén referenciadas a ese sistema de coordenadas.

Estos parámetros son necesarios para poder empezar a trabajar en la simulación. El resto de parámetros específicos de cada estudio puede introducirse posteriormente.

4.2 Simulación del radioenlace hospital de Estella-Silo en SIRENET

En este proyecto, la red que ha de implementarse, consiste en un enlace punto a punto; por lo que en el momento de crear el estudio aparecerá una pantalla como la mostrada en la Figura 4.2, en la que elegiremos “vano”, de tal manera que los pasos siguientes irán en relación a esta elección.

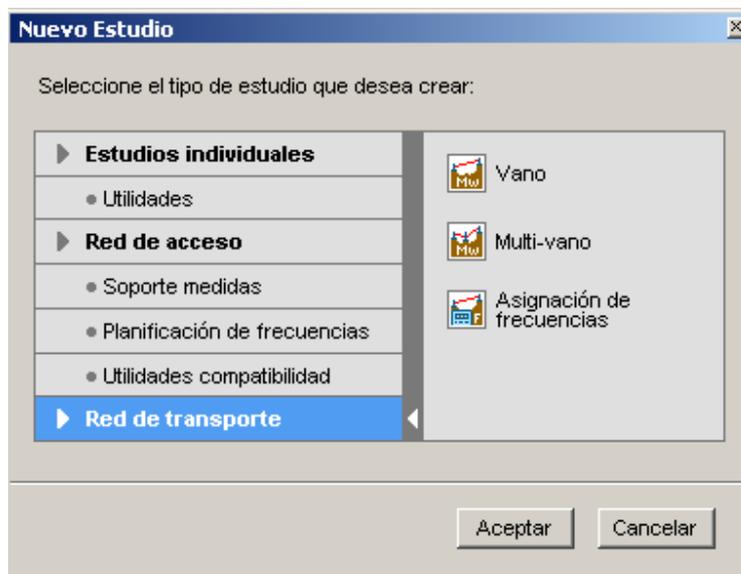


Figura 4.2: Elección del tipo de vano.

Una vez generado el estudio se pueden modificar sus parámetros (Figura 4.3).

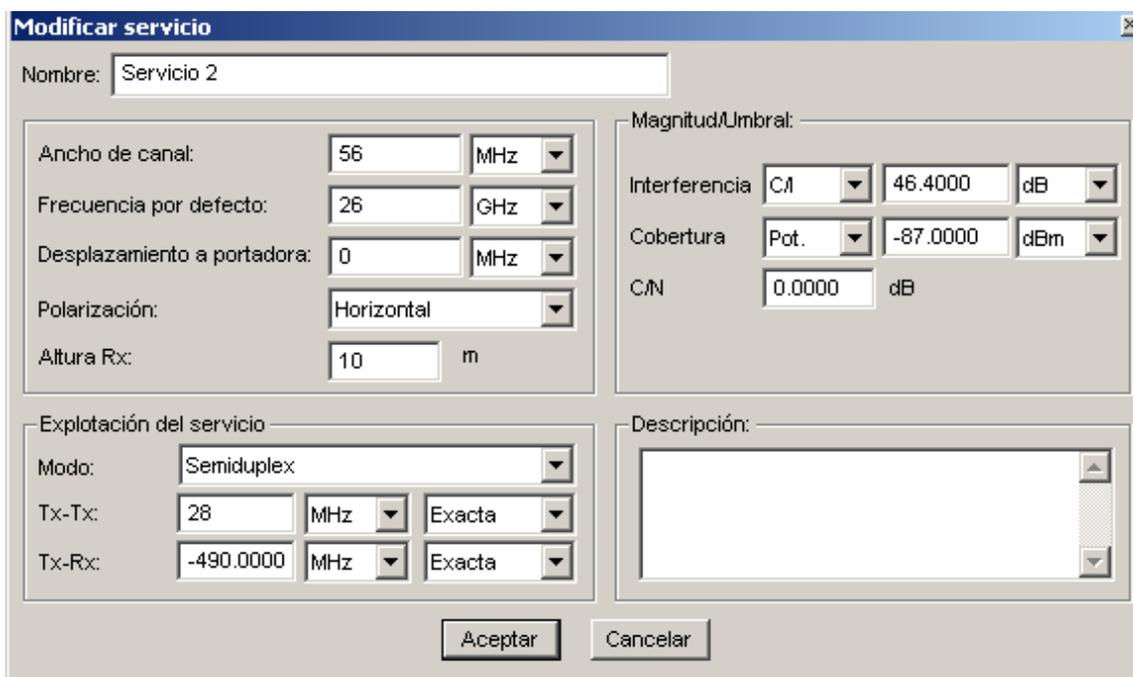


Figura 4.3: Modificar parámetros del estudio.

Los parámetros que van a influir posteriormente en los cálculos del análisis del radioenlace son los que están en el recuadro superior derecho. Los restantes parámetros no influirán en los resultados obtenidos por lo que no se les prestará mucha atención.

La elección de la frecuencia y el ancho del canal se ha explicado en apartados anteriores, no obstante, repetir que se ha llevado a cabo dicha elección debido a los parámetros frecuenciales de los equipos Ceragon.

Respecto a la polarización, se elige horizontal por la mayor influencia de los factores climatológicos en dicha polarización. Por tanto si el radioenlace es viable en polarización horizontal, también lo será para polarización vertical.

Se ha fijado 10m como altura de las antenas respecto del nivel del suelo. Esta medida se ha aproximado teniendo en cuenta las tres alturas del Silo más la altura del mástil de la antena, de la misma manera en el hospital, ya que como se dijo anteriormente, la antena se colocará en la azotea. A pesar de ser aproximada, para la simulación es totalmente válida.

El siguiente paso que se debe seguir para la simulación del radioenlace es colocar tanto el receptor como el transmisor.

Para configurar los parámetros del transmisor SIRENET proporciona varias ventanas (Figura 4.4).

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 4.4: Configurar parámetros del transmisor.

En la pestaña “identificación” (Figura 4.4(a)), se indica el nombre que llevará el transmisor y sus coordenadas.

En “parámetros de radio” (Figura 4.4(b)), se indica qué parámetros queremos para nuestro radioenlace, eligiendo el servicio que hemos determinado anteriormente. Dichos parámetros son a qué frecuencia va a trabajar el enlace y la polarización que se va a utilizar. En este caso ponemos horizontal porque es el peor caso en cuestión de atenuación.

En los “parámetros de antena” (Figura 4.4(c)), la potencia de transmisión son 15 dBm tal y como se indica en la hoja de especificaciones del equipo de radio Ceragon IP-20C.

El tipo de antena para la simulación se escoge de manera que la ganancia y la frecuencia a la que trabaje correspondan con los datos reales de la antena escogida.

La inclinación y azimut de la antena están especificadas en la hoja de características.

Respecto al “servicio fijo” (Figura 4.4(d)), se especifica una velocidad de 500 Mbps ya que el radioenlace tendrá una capacidad de 1Gbps, pero dividida para cada una de las polarizaciones.

La modulación a usar será de 2048QAM y los valores de MTBF y MTTR determinados por el fabricante serán de 50 años y una hora respectivamente.

Para determinar los parámetros del receptor el proceso es igual (Figura 4.5).

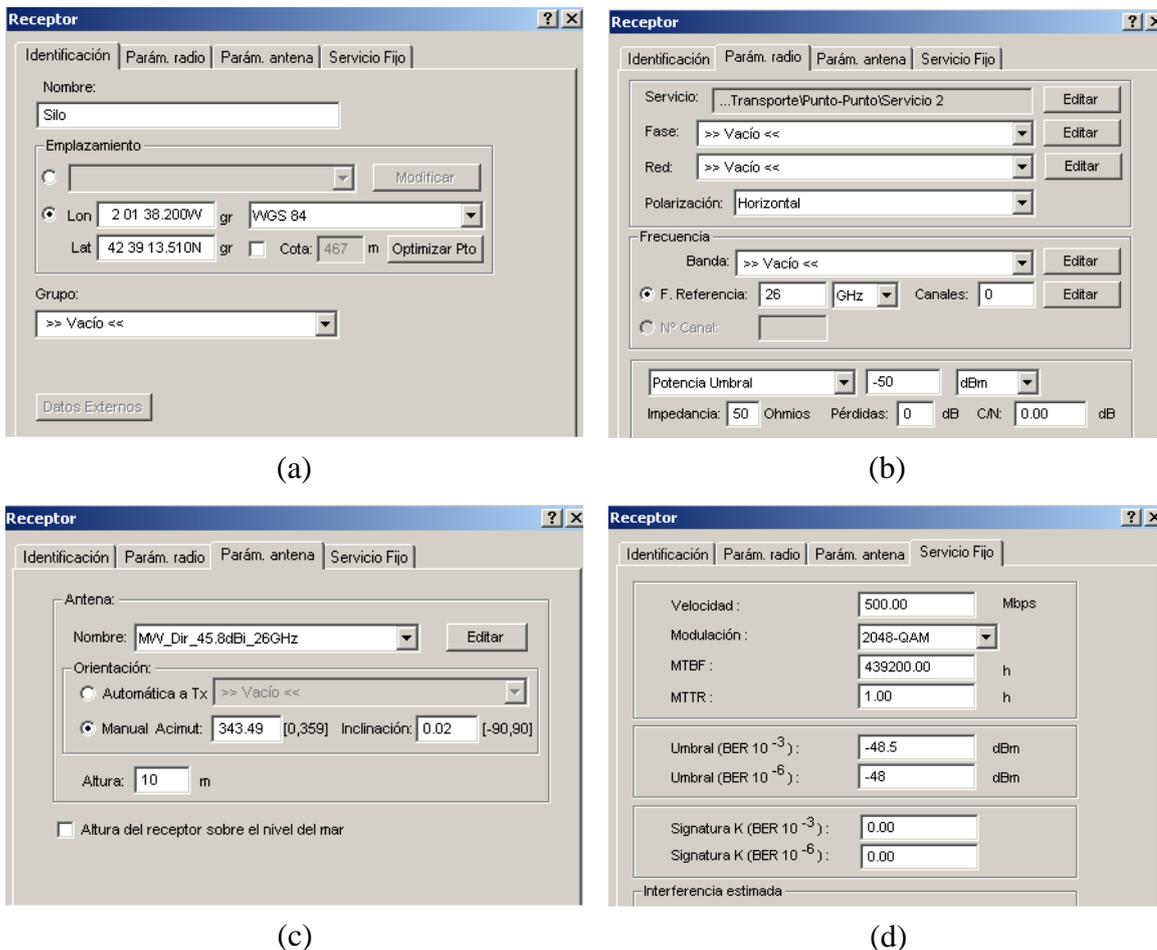


Figura 4.5: Configurar parámetros del receptor.

Suponemos que el receptor es el Silo aunque es indiferente ya que ambos emplazamientos transmitirán y recibirán datos.

En “identificación” (Figura 4.5(a)), se indica el nombre que llevará el receptor y sus coordenadas.

En “parámetros de radio” (Figura 4.5(b)) además de los mismos parámetros que en el transmisor, se determina la sensibilidad del receptor que en este caso es -50dBm, cifra presente en las especificaciones del equipo de radio.

Los “parámetros de antena” (Figura 4.5(c)) son los mismos que en el transmisor solo que orientadas diferente, con distintos valores de azimut e inclinación.

En “servicio fijo” (Figura 4.5(d)), la velocidad y modulación se mantienen igual, mientras que ahora se especifican valores umbrales para cierto BER (10^{-3} , 10^{-6}).

Se pueden modificar los parámetros de análisis en la Figura 4.6.

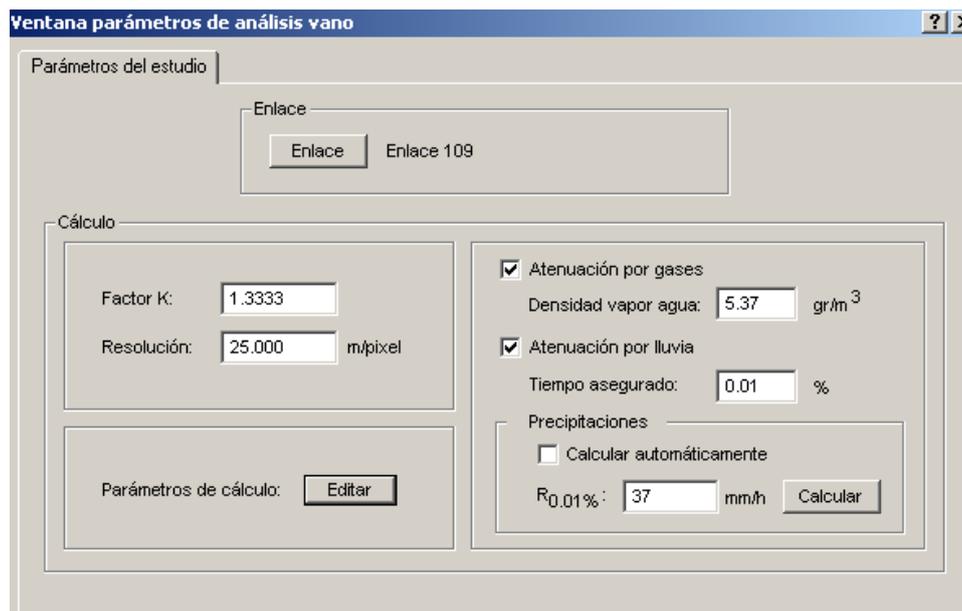


Figura 4.6: Configurar parámetros de análisis del vano.

En ella se determina la atenuación por gases y la atenuación por lluvia (activando las correspondientes casillas), parámetros necesarios para la simulación del radioenlace y el cálculo de su viabilidad.

Activando “atenuación por gases”, se añaden las pérdidas calculadas con el método de propagación. Las pérdidas se producen a altas frecuencias debidas a los efectos de los gases y vapores atmosféricos como se ha explicado en apartados anteriores.

La densidad del vapor de agua viene determinada por la humedad entre la densidad de vapor por saturación, en la zona climática en la que se encuentran los emplazamientos.

Considerando el peor mes del año (diciembre), con una temperatura media de 6°C, la humedad relativa es 0.79 y la densidad de vapor de saturación es 6.8.

$$\text{Densidad de vapor} = \frac{\text{humedad}}{\text{densidad de vapor de saturación}} = \frac{0.79}{6.8} = 5.37 \text{ gm/m}^3 \quad (4.1)$$

Activando “Atenuación por lluvia” se añaden las pérdidas que produce la lluvia en la señal en altas frecuencias.

Esta opción calcula la atenuación de lluvia rebasada para un 0.01% del tiempo y suma esa atenuación a la obtenida mediante el cálculo de propagación para cielo despejado.

Es decir, introducir estas pérdidas es igual a forzar que está lloviendo en el momento de la simulación con un nivel de precipitaciones igual al que proponga el mapa de la Figura 2.3.

El valor de densidad de precipitaciones para el 0.01% del tiempo (R) es 37 mm/h, factor que depende de la zona geoclimática. El mapa del que se puede extraer este dato se muestra en el apartado de precipitaciones.

Así mismo, se pueden fijar los parámetros de cálculo pulsando el botón “editar” donde se desplegarán una serie de pestañas (Figura 4.7).

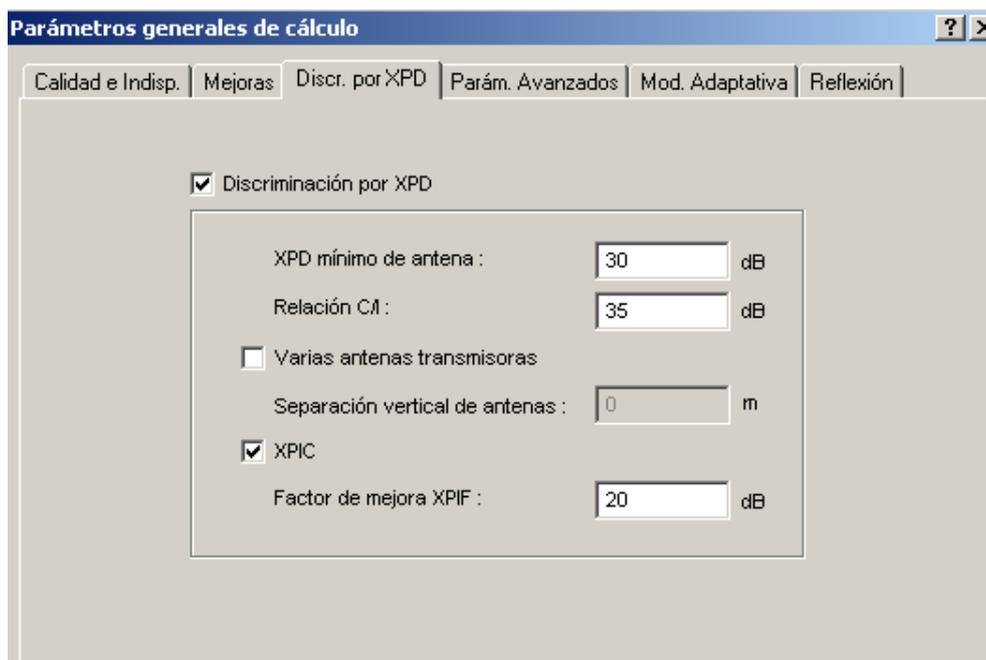


Figura 4.7: Parámetros de cálculo.

Los parámetros que se observan en la imagen vienen determinados por la hoja de especificaciones de la antena VHLP3-26.

En la pestaña “reflexión” se proponen varios tipos de terreno para simular el comportamiento del rayo reflejado. Ahí, se ha optado por suelo húmedo ya que de las opciones que el programa proporciona (mar, agua dulce, suelo seco, suelo muy seco y hielo) es la más aproximada a la realidad.

El resto de parámetros no tienen por qué ser modificados.

En la pestaña “Calidad e Indisponibilidad” se fija el objetivo de indisponibilidad, SESR, ESR y BBER. Se dejan los que vienen por defecto.

En “Mejoras” se puede establecer cierta redundancia en los quipos para mejorar la indisponibilidad del vano digital, así como establecer técnicas de diversidad para mejorar las características de error.

En “Parám. Avanzados”, recoge una serie de parámetros avanzados para la obtención de resultados de características de error del estudio. Pero no hace falta porque SIRENET hace una aproximación de los mismos.

En “Modulación Adaptativa” se pueden determinar varios perfiles de modulación y SIRENET hace el cálculo y evalúa la viabilidad de cada uno de ellos. Pero no hace falta ya que fijamos la modulación en 2048, el peor caso.

Una vez que se hayan fijado todos los parámetros del radioenlace, se simula el enlace. Como primer resultado aparecerá la pantalla mostrada en la Figura 4.8 que corresponde con el perfil topográfico del vano del radioenlace y a la izquierda los resultados de la simulación. Se ve una franja negra que muestra la curvatura de la tierra, pero en este caso se trata de un radioenlace de muy corta distancia por lo que se puede considerar la tierra como plana.

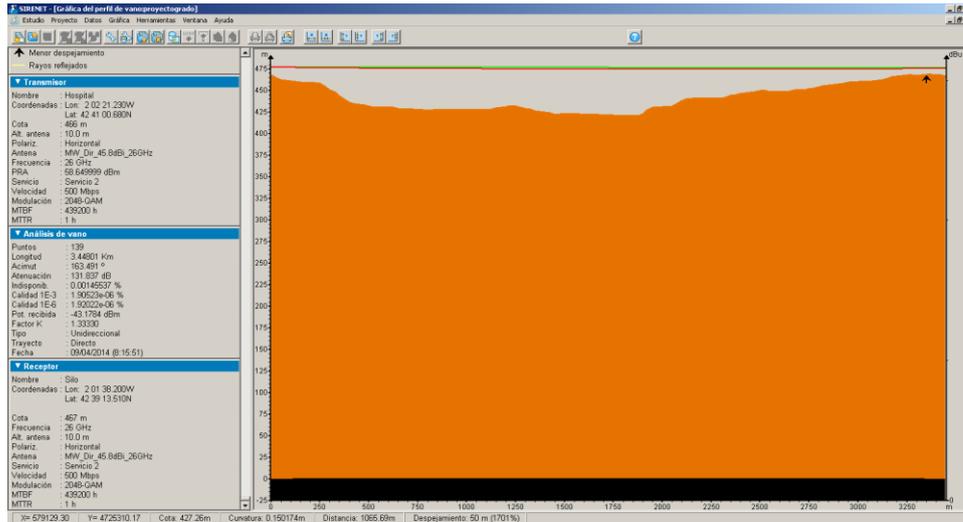


Figura 4.8: Simulación del enlace.

En el perfil topográfico se observa que hay visibilidad directa. En el eje izquierdo de ordenadas aparece la altura del terreno en metros y en el de la derecha los valores de campo en dBu. La línea marcada de verde, es el rayo directo entre transmisor y receptor, mientras que la línea marcada de rojo es el elipsoide de Fresnel (Figura 4.9).

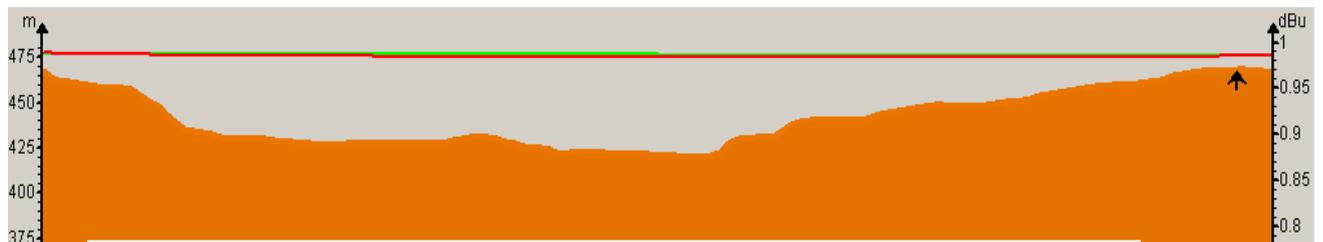


Figura 4.9: Perfil topográfico.

En la parte izquierda de la pantalla se muestran los datos del radioenlace introducidos previamente y algún resultado como la potencia recibida y la indisponibilidad. Se presentan más claramente en la Figura 4.10.

▼ Transmisor		▼ Receptor	
Nombre	: Hospital	Nombre	: Silo
Coordenadas	: Lon: 2 02 21.230W Lat: 42 41 00.680N	Coordenadas	: Lon: 2 01 38.200W Lat: 42 39 13.510N
Cota	: 466 m	Cota	: 467 m
Alt. antena	: 10.0 m	Frecuencia	: 26 GHz
Polariz.	: Horizontal	Alt. antena	: 10.0 m
Antena	: MW_Dir_45.8dBi_26GHz	Polariz.	: Horizontal
Frecuencia	: 26 GHz	Antena	: MW_Dir_45.8dBi_26GHz
PRA	: 58.649999 dBm	Servicio	: Servicio 2
Servicio	: Servicio 2	Velocidad	: 500 Mbps
Velocidad	: 500 Mbps	Modulación	: 2048-QAM
Modulación	: 2048-QAM	MTBF	: 439200 h
MTBF	: 439200 h	MTTR	: 1 h
MTTR	: 1 h		
▼ Análisis de vano			
Puntos	: 139		
Longitud	: 3.44801 Km		
Acimut	: 163.491 °		
Atenuación	: 131.837 dB		
Indisponib.	: 0.00145537 %		
Calidad 1E-3	: 1.90523e-06 %		
Calidad 1E-6	: 1.92022e-06 %		
Pot. recibida	: -43.1784 dBm		
Factor K	: 1.33330		
Tipo	: Unidireccional		
Trayecto	: Directo		
Fecha	: 09/04/2014 (8:15:51)		

Figura 4.10: Datos del radioenlace y algún resultado de la simulación.

La sensibilidad del receptor es de -50 dBm, y la señal recibida es de -43.17 dBm en malas condiciones meteorológicas por lo que el balance de potencias se cumple.

Respecto a la indisponibilidad, se fija un valor que no se debe superar, en tal caso, el radioenlace no será viable.

En este proyecto se ha fijado un valor de indisponibilidad del 0.04% y se ha obtenido el 0.001% por lo que se considera viable.

Se pueden observar los resultados del análisis en una ventana que contiene varias pestañas (Figura 4.11). Éstos se van a comentar a continuación.

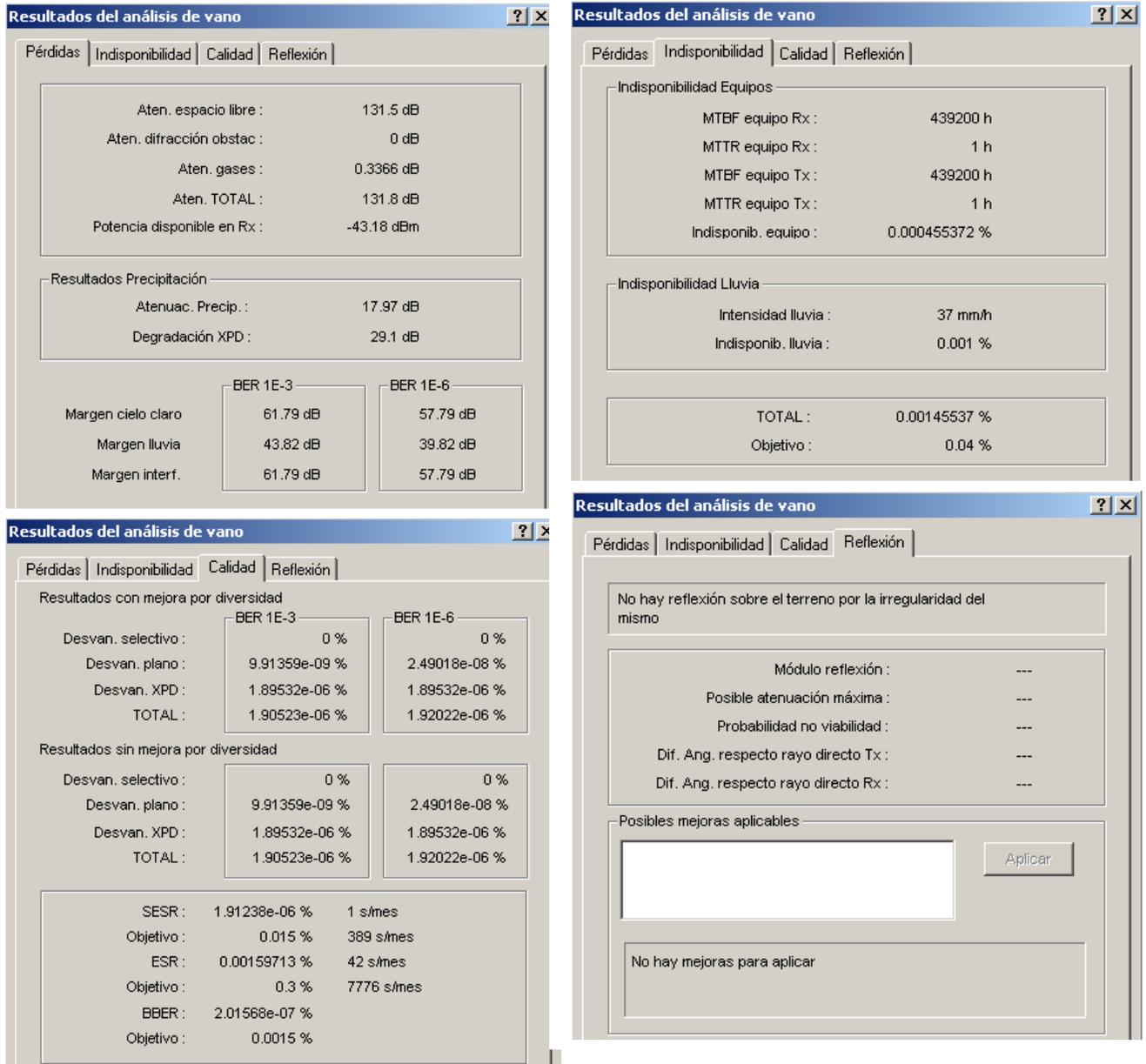


Figura 4.11: Resultados de la simulación.

1) Pérdidas

En esta pestaña se desglosan los distintos tipos de pérdidas explicadas en apartados anteriores.

Sirenet se basa en la normativa ITU para el cálculo de todos los parámetros siguientes. Si el usuario quiere comprobar la veracidad de los resultados puede hacerlo utilizando las fórmulas de los apartados teóricos.

Se especificará qué normativa se ha usado para el cálculo de cada parámetro.

- Atenuación por espacio libre (Rec. P. 525-2)
- Atenuación por difracción (modelo de Deygout)
- Atenuación por gases (UIT-R P.530, UIT-R P.676)
- Atenuación por precipitaciones (UIT-R P.837-5)
- Atenuación total

- Potencia disponible en recepción

Además se presentan el margen de desvanecimiento en cielo claro, con lluvia y en presencia de interferencias; para un BER de 10^{-3} y 10^{-6} .

2) *Indisponibilidad*

Para calcular la indisponibilidad se tiene en cuenta la tasa de fallos y el tiempo medio de reparación de los equipos transmisor y receptor, así como la probabilidad de que se produzca un corte de la comunicación debido a las precipitaciones.

3) *Calidad*

La recomendación G.821 define la calidad de un radioenlace en función de los bits erróneos. Para ello se desglosan los siguientes resultados para un BER de 10^{-3} y 10^{-6} :

- Probabilidad de desvanecimiento plano
- Probabilidad de desvanecimiento selectivo
- Probabilidad de desvanecimiento por XPD
- Probabilidad de desvanecimiento total

Además de los resultados anteriores se ofrecen una serie de resultados basados en la recomendación G.826 que toman como referencia los bloques erróneos:

- Segundo severamente degradados (SES), correspondiente a una tasa de un 30% de bloques erróneos.
- Segundos degradados (ES), periodo de un segundo con uno o más bloques erróneos.
- Bloques con errores de fondo (BBE), bloques con errores que no pertenecen a un SES.

4) *Reflexiones*

En esta pestaña se presentan las posibles reflexiones que pueden producirse en el trayecto. Sin embargo, como se ve en el perfil topográfico, no existe un rayo reflejado que puede dar lugar a problemas.

5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Como ya se ha explicado, los equipos radio que se van a utilizar utilizan doble polarización. En cada polarización se transmiten 500 Mbps de manera que la capacidad total del enlace es de 1Gbps.

Se comprueba dicha capacidad con un generador de tráfico del cual se ha hecho una captura de pantalla y se observa que la capacidad es 1Gbps.

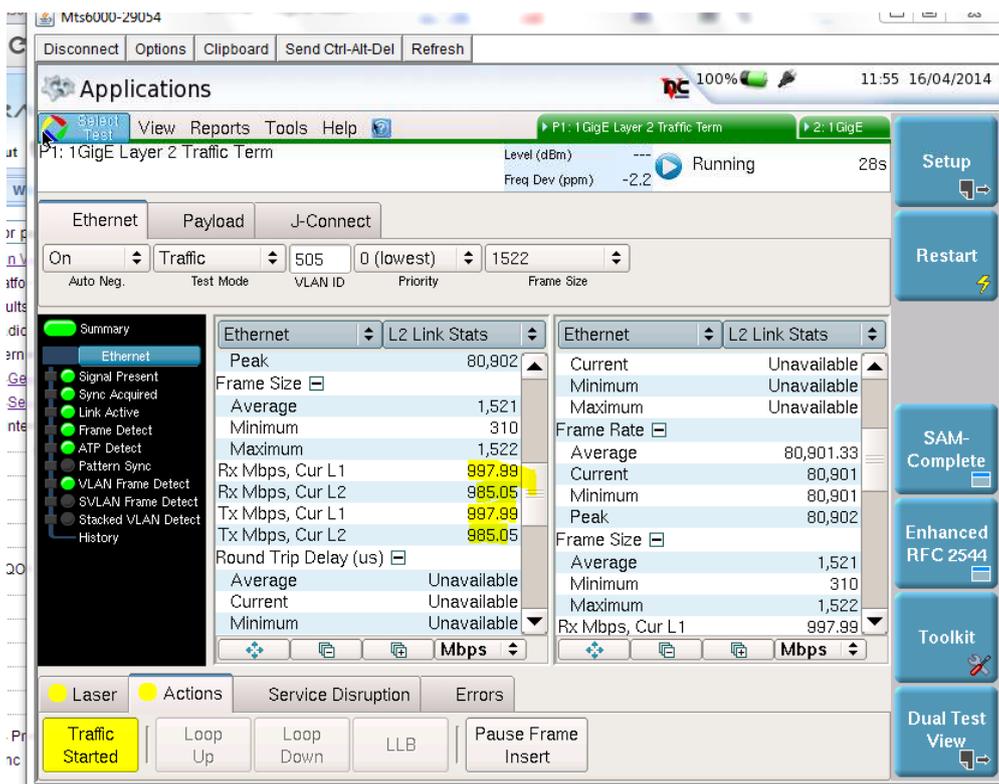


Figura 5. 1: Captura generador de tráfico, dos canales activos

Para comprobar que cada canal tiene una capacidad de 500 Mbps, se silencia un canal de radio del transmisor y en la Figura 5.2 se observa que al receptor sólo llegan 500 Mbps.

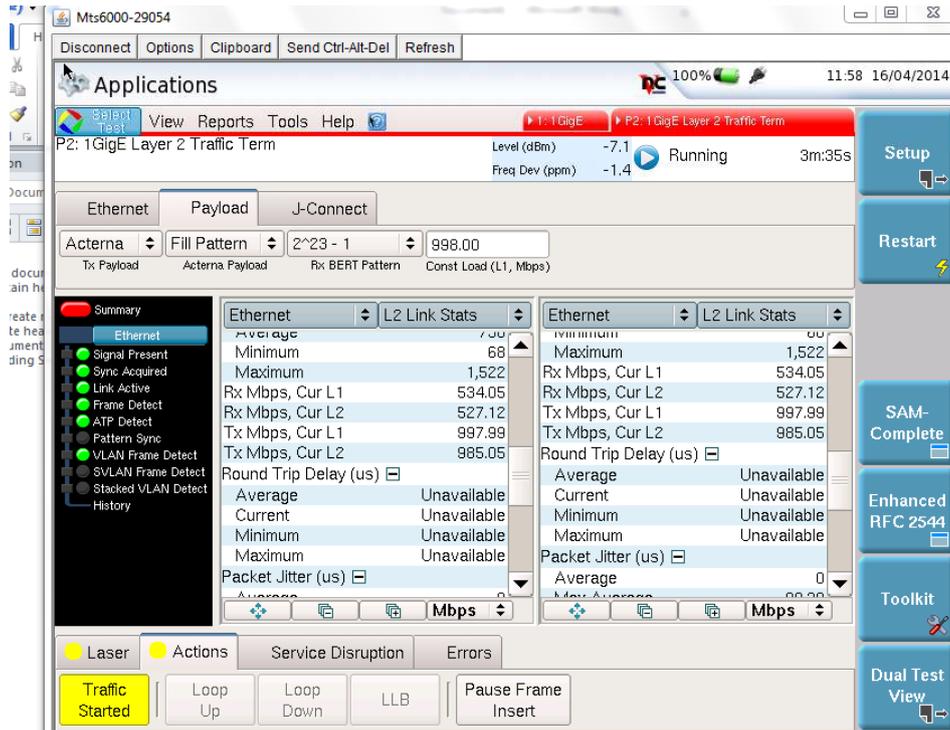


Figura 5. 2: Captura generador de tráfico, 1 canal activo y otro silenciado.

6. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

Conclusiones

Se ha analizado un radioenlace cuyos extremos se encuentran ubicados en el hospital Garcia Orcoyen de Estella y en el silo de la misma localidad. Dicho radioenlace tiene la finalidad de proporcionar al hospital de mayor capacidad (1Gpbs) para la transmisión de datos a pamplona ya que el enlace implantado actualmente es de 40Mbps.

Se ha comprobado que el radioenlace es viable trabajando a 26GHz ya que se trata de un radioenlace de corta distancia y de alta capacidad a pesar de que a esta frecuencia, la atenuación por espacio libre, por gases y precipitaciones es muy importante.

Se ha determinado que los equipos radio van a ser los IP-20C de Ceragon. Esta elección es debida a la doble polarización que los equipos soportan, de tal manera que transmitiendo aproximadamente 500 Mbps en cada polarización, se alcanza la capacidad deseada de 1 Gbps. También trabajan a 26 GHz y con un ancho de banda de 56 MHz e implementan modulación adaptativa (ACM) y XPIC entre otras prestaciones.

Se ha escogido una antena VHLP3-26 que es compatible con el equipo Ceragon. La antena trabaja en la banda de 26 GHz y tiene un diámetro de 1m.

Finalmente, se ha comprobado que el radioenlace es viable ya que la probabilidad de indisponibilidad está por debajo del 0.04%. Esto se ha comprobado mediante el programa de simulación Sirenet, al cual se le introducen las características del vano y de los equipos.

Líneas futuras

- Tras el diseño del radioenlace, se espera la implantación del mismo en cuanto la empresa reciba los equipos.
- Una vez implantado, se procederá a la realización de medidas para comprobar el buen funcionamiento de los equipos.
- Dichas medidas se compararán con las simulaciones realizadas en Sirenet, y se comprobará que los equipos cumplen las especificaciones y el funcionamiento de XPIC y ACM ante malas condiciones meteorológicas.

REFERENCIAS

[CAR02]: Cardama-Aznar,A., Jofre-Roca, L., Rius-Casals,J.M., Romeu-Robert,J. y Blanch-Boris,S. (2002).*Antenas*.

[FER08]: Fernandez, J.J. (2008). *Diseño de un enlace de microondas y estación teledifusora*. Caracas:

[LAN08]: Landaeta, S. y Channiel, J.(2008). *Estudio de factibilidad de la expansión del backbone de la red SDH de Movistar existente entre Mtso San Cristobal y Socopó*.

Caracas:

[http://saber.ucv.ve/xmlui/bitstream/123456789/766/1/Estudio%20de%20factibilidad%20\(Ingenier%C3%ADa%20de%20Detalle%20de%20la%20Expansi%C3%B3n%20del%20Backbone%20de%20la%20Red%20SDH%20de%20Movi.pdf](http://saber.ucv.ve/xmlui/bitstream/123456789/766/1/Estudio%20de%20factibilidad%20(Ingenier%C3%ADa%20de%20Detalle%20de%20la%20Expansi%C3%B3n%20del%20Backbone%20de%20la%20Red%20SDH%20de%20Movi.pdf)

[MIN09]: Ministerio de industria, turismo y comercio. (2009). *Información útil para cumplimentar las solicitudes de título habilitante del Servicio Fijo de banda ancha*.

http://www.alora-soluciones.es/newsletters/images/Boletin_10/Informacion_%20S_Fijo_banda_ancha.pdf

[MIN14]: Ministerio de industria, turismo y comercio. (2014). *Bandas y canalizaciones disponibles en el Servicio Fijo de banda ancha*. <https://sede.minetur.gob.es/ES/procedimientoselectronicos/Documents/SE%20Telecomunicaciones/Redes%20Radioelectricas%20Servicio%20Banda%20Ancha/Bandas-Frecuencia-Canalizaciones-Disponibles-S-Fijo-BandaAnchav12.pdf>

[WEB01]: Tipos de desvanecimiento. (2014).

<http://desvanecimientosradioenlaces.wikispaces.com/Tipos+de+Desvanecimiento>

[WEB02]: Saburido, Alvaro. *OFDM*. (2014). <http://www.modulo0tutoriales.com/ofdm-multiplexacion-por-division-de/>

[WEB03]: RECOMENDACIÓN UIT-R P.530-7. *Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa*.

https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-7-199708-S!!PDF-S.pdf

[WEB04]: RECOMENDACIÓN UIT-R P.453-10. *Índice de refracción radioeléctrica: Su fórmula y datos sobre la refractividad*.

http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.453-10-201202-I!!PDF-S.pdf

[WEB05]: RECOMENDACIÓN UIT-R P.634-4. *Objetivos de característica de error y de disponibilidad para secciones digitales ficticias de referencia que constituyen un tramo o la totalidad de la parte de grado medio de una conexión de la red digital de servicios integrados a una velocidad binaria inferior a la velocidad primaria que utilizan los sistemas de radioenlaces digitales que forman parte de un circuito de alto grado dentro de una red digital de servicios integrados*.

http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.634-4-199709-I!!PDF-S.pdf

[WEB06]: RECOMENDACIÓN UIT-R P.1093-1. *Efectos de la propagación multitrayecto en el diseño y funcionamiento de los sistemas de radioenlaces digitales con visibilidad directa.*

http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/f/R-REC-F.1093-1-199709-S!!PDF-S.pdf

[WEB07]: TABLA 101: *Plan de distribución de canales banda de 26GHz.*

<http://www.ane.gov.co/cnabf/modulos/pdfs/tabla101.pdf>

ANEXO I – Especificaciones IP20-C

Especificaciones generales radio 18-42 GHz

Specification	18 GHz	23 GHz	24UL GHz	26 GHz	28 GHz	32 GHz	38 GHz	42 GHz
Standards	EN 302 217							
Operating Frequency Range (GHz)	17.7-19.7	21.2-23.65	24.0-24.25	24.2-26.5	27.35-29.5	31.8-33.4	37-40	40.55-43.45
Tx/Rx Spacing (MHz)	1010, 1120, 1008, 1560	1008, 1200, 1232	Customer-defined	800, 1008	350, 450, 490, 1008	812	1000, 1260, 700	1500
Frequency Source	Synthesizer							
RF Channel Selection	Via EMS/NMS							
System Configurations	MultiCore 2+0 Single/Dual Polarization, MultiCore 2+2 SP/DP HSB, 2 x MultiCore 2+0 SP/DP LoS 4x4 MIMO, LoS 2x2 MIMO							
Tx Range (Manual/ATPC)	Up to 25dB dynamic range							

Capacidad (Mbps)

Profile	Modulation	Minimum required capacity license	Ethernet Throughput		
			No Compression	L2 Compression	Header De-Duplication
0	QPSK	100	83-101	83-122	87-314
1	8 PSK	100	123-150	124-182	129-468
2	16 QAM	150	167-205	169-247	176-637
3	32 QAM	225	220-269	222-325	231-838
4	64 QAM	300	270-331	272-400	284-1000
5	128 QAM	300	327-400	329-483	343-1000
6	256 QAM	400	374-457	377-552	393-1000
7	512 QAM	400	406-496	409-600	426-1000
8	1024 QAM (Strong FEC)	450	441-540	445-652	464-1000
9	1024 QAM (Light FEC)	450	469-573	472-692	492-1000
10	2048 QAM	500	508-621	512-751	534-1000

Potencia de transmisión (dBm)

Modulation	6-8 GHz	10-11 GHz	13-15 GHz	18-23 GHz	24GHz UL ³²	26 GHz	28,32,38 GHz	42 GHz
QPSK	26	24	24	22	-17	21	18	16
8 PSK	26	24	24	22	-18	21	18	16
16 QAM	25	23	23	21	-19	20	17	15
32 QAM	24	22	22	20	-19	19	16	14
64 QAM	24	22	22	20	-19	19	16	14
128 QAM	24	22	22	20	-19	19	16	14
256 QAM	24	22	22	20	-19	19	16	14
512 QAM	22	21	20	18	-21	17	14	12
1024 QAM	22	20	20	18	-21	17	14	12
2048 QAM	20	18	18	16	-23	15	12	10

Sensibilidad (dBm)

Profile	Modulation	Channel Spacing	Frequency (GHz)													
			6	7	8	10	11	13	15	18-23	24	26	28-32	36	38	42
0	QPSK	56 MHz	-82.5	-82.0	-81.5	-82.0	-83.0	-82.0	-81.5	-81.0	-80.5	-80.0	-80.5	-79.5	-79.0	-78.5
1	8 PSK		-78.5	-78.0	-77.5	-78.0	-79.0	-78.0	-77.5	-77.0	-76.5	-76.0	-76.5	-75.5	-75.0	-74.5
2	16 QAM		-76.0	-75.5	-75.0	-75.5	-76.5	-75.5	-75.0	-74.5	-74.0	-73.5	-74.0	-73.0	-72.5	-72.0
3	32 QAM		-72.5	-72.0	-71.5	-72.0	-73.0	-72.0	-71.5	-71.0	-70.5	-70.0	-70.5	-69.5	-69.0	-68.5
4	64 QAM		-69.5	-69.0	-68.5	-69.0	-70.0	-69.0	-68.5	-68.0	-67.5	-67.0	-67.5	-66.5	-66.0	-65.5
5	128 QAM		-66.5	-66.0	-65.5	-66.0	-67.0	-66.0	-65.5	-65.0	-64.5	-64.0	-64.5	-63.5	-63.0	-62.5
6	256 QAM		-63.5	-63.0	-62.5	-63.0	-64.0	-63.0	-62.5	-62.0	-61.5	-61.0	-61.5	-60.5	-60.0	-59.5
7	512 QAM		-61.5	-61.0	-60.5	-61.0	-62.0	-61.0	-60.5	-60.0	-59.5	-59.0	-59.5	-58.5	-58.0	-57.5
8	1024 QAM (strong FEC)		-58.0	-57.5	-57.0	-57.5	-58.5	-57.5	-57.0	-56.5	-56.0	-55.5	-56.0	-55.0	-54.5	-54.0
9	1024 QAM (light FEC)		-57.0	-56.5	-56.0	-56.5	-57.5	-56.5	-56.0	-55.5	-55.0	-54.5	-55.0	-54.0	-53.5	-53.0
10	2048 QAM		-52.5	-52.0	-51.5	-52.0	-53.0	-52.0	-51.5	-51.0	-50.5	-50.0	-50.5	-49.5	-49.0	-48.5

Pérdidas de los dispositivos (dB)

Configuration	Interfaces		6-8 GHz	11 GHz	13-15 GHz	18-26 GHz	28-42 GHz
Flex WG	Remote Mount antenna	Added on remote mount configurations	0.5	0.5	1.2	1.5	1.5
Using Dual Core mediation device	Direct Mount	Integrated antenna	0.2	0.2	0.4	0.5	0.5
MultiCore 1+1 HSB (ready for 2+2) with asymmetrical coupler	Direct Mount	Main Path	1.6	1.6	1.8	2	2
		Secondary Path	6	6	6	6	6
MultiCore 1+1 HSB (ready for 2+2) with asymmetrical coupler	Remote Mount	Main Path	1.4	1.4	1.6	1.8	1.8
		Secondary Path	6	6	6	6	6
MultiCore 2+0 DP (OMT)	Direct Mount	Integrated antenna	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
MultiCore 2+2 HSB (OMT) with asymmetrical coupler	Remote Mount	Main Path	1.9	1.9	2.1	2.3	2.3
		Secondary Path	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
MultiCore 2+0/1+1 FD SP	Integrated antenna		3.8	3.8	3.9	4	4
2 x MultiCore 2+0 DP (OMT)	Remote Mount		4.2	4.2	4.3	4.4	4.4

Latencia

ACM Working Point	Modulation	Frame Size	Latency (usec) with GE Interface						
			64	128	256	512	1024	1280	1518
0	QPSK		100	104	120	136	174	192	210
1	8 PSK		106	110	122	135	166	180	194
2	16 QAM		72	75	86	97	122	134	147
3	32 QAM		67	69	78	88	112	123	134
4	64 QAM		63	65	74	83	105	114	124
5	128 QAM		59	61	69	78	99	108	118
6	256 QAM		59	61	69	77	97	105	114
7	512 QAM		62	64	72	80	100	108	117
8	1024 QAM (strong FEC)		59	61	68	76	96	104	113
9	1024 QAM (light FEC)		59	61	69	77	96	104	113
10	2048 QAM		56	57	65	73	92	100	108

Especificaciones mecánicas

Module Dimensions	(H)230mm x (W)233mm x (D)98mm
Module Weight	6.5 kg,
Pole Diameter Range (for Remote Mount Installation)	8.89 cm – 11.43 cm

ANEXO II – VHLP3-26

Product Specifications



VHLP3-26

1.0 m | 3 ft ValuLine® High Performance Low Profile Antenna, single-polarized, 24.250–26.500 GHz



CHARACTERISTICS

General Specifications

Antenna Type	VHLP - ValuLine® High Performance Low Profile Antenna, single-polarized
Diameter, nominal	1.0 m 3 ft
Polarization	Single

Electrical Specifications

Beamwidth, Horizontal	0.8 °
Beamwidth, Vertical	0.8 °
Cross Polarization Discrimination (XPD)	30 dB
Electrical Compliance	Brazil Anatel Class 2 ETSI 302 217 Class 3 US FCC Part 101A
Front-to-Back Ratio	73 dB
Gain, Low Band	45.6 dBi
Gain, Mid Band	45.8 dBi
Gain, Top Band	46.2 dBi
Operating Frequency Band	24.250 – 26.500 GHz
Radiation Pattern Envelope Reference (RPE)	7156
Return Loss	17.7 dB
VSWR	1.30

Mechanical Specifications

Fine Azimuth Adjustment	±15°
Fine Elevation Adjustment	±15°
Mounting Pipe Diameter	115 mm 4.5 in
Net Weight	24 kg 53 lb
Side Struts, Included	0



Product Specifications

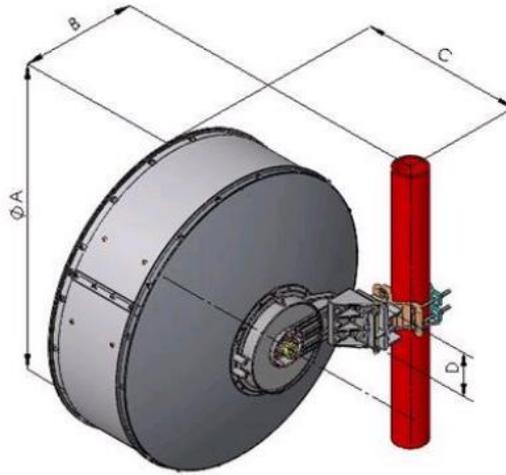
VHLP3-26

Side Struts, Optional	1 inboard
Wind Velocity Operational	180 km/h 112 mph
Wind Velocity Survival Rating	250 km/h 155 mph

Wind Forces At Wind Velocity Survival Rating

Angle α for MT Max	0 °
Axial Force (FA)	2979 N 670 lbf
Side Force (FS)	936 N 210 lbf
Twisting Moment (MT)	1184 N•m
Weight with 1/2 in (12 mm) Radial Ice	46 kg 101 lb
Zcg with 1/2 in (12 mm) Radial Ice	220 mm 9 in
Zcg without Ice	324 mm 13 in

Antenna Dimensions And Mounting Information



Dimensions in Inches (mm)				
Antenna Size, ft (m)	A	B	C	D
3(0.9)	39.4 (1000)	17.5 (445)	23.1 (586)	6.3 (160)