

## 14. El diseño de la red de telecomunicación

**Carlos Rey Moreno<sup>1</sup>, Edwin Leopoldo Liñán Benítez<sup>2</sup>,  
Juan Antonio Paco Fernández<sup>2</sup>, César Córdova Bernuy<sup>2</sup>,  
River Quispe Tacas<sup>2</sup> y Francisco Javier Simó Reigadas<sup>3</sup>**

No se puede decir que exista una única solución tecnológica con la cual diseñar todas las redes que se pretendan instalar en zonas rurales de países en desarrollo, sino más bien todo lo contrario: para cada conjunto de ubicaciones que se requiera enlazar habrá que realizar un diseño individual, teniendo en cuenta los condicionantes específicos de la zona donde se pretende desplegar la red. Estos condicionantes van desde las políticas de uso de las bandas de frecuencias, o la disponibilidad de equipos y repuestos de una determinada tecnología en el mercado local, hasta el presupuesto total del proyecto o el conocimiento de una determinada tecnología por el personal local, sin olvidar lo más importante: las necesidades de comunicación reales de la población beneficiaria del proyecto.

El diseño de una red de telecomunicaciones parte, por tanto, del estudio de dichos condicionantes. Para ello es necesario realizar un desplazamiento preliminar a la zona donde se obtengan todos los datos necesarios para conocer el tipo de red que se requiere; los pasos a seguir en esta etapa se describen en la Sección 14.1. Una vez conocidos dichos datos, es necesario realizar un dimensionamiento de la red, de forma que se sepa la capacidad que ésta tiene que soportar para dar servicio a las necesidades identificadas; este proceso se describirá en la Sección 14.2. Tras ello, será necesario realizar un análisis radioeléctrico para determinar la viabilidad de los enlaces que permitan conectar las ubicaciones consideradas con la calidad suficiente como para proporcionar la capacidad requerida; para ello se puede hacer uso de una aplicación de planificación radioeléctrica. Además, sería pertinente hacer una simulación de la red para estudiar si los enlaces obtenidos proporcionan la calidad requerida por los usuarios, no sólo en términos de capacidad sino de retardo y otras características. Tanto la planificación radioeléctrica, como la simulación de red se presentan en detalle en la Sección 14.3. Cuando se tiene seguridad de que los enlaces son viables y que van a soportar el tráfico requerido, se procede a diseñar la red que se instalará físicamente; el procedimiento

---

<sup>1</sup>Fundación EHAS/Universidad Rey Juan Carlos, España

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú

<sup>3</sup>Universidad Rey Juan Carlos, España

para realizar dicho diseño se presenta en la sección 14.4. El estudio de viabilidad también proporcionará algunos datos para la configuración de los dispositivos, lo cual se presenta en la sección 14.5. El diseño ha de ser validado y aprobado con la población beneficiaria antes de proceder a realizar el presupuesto detallado que dará lugar a las compras; la necesidad y la forma de llevar a cabo dicha validación se presenta en la Sección 14.6, mientras que el listado de materiales, el presupuesto detallado y los planos de instalación se describen en la Sección 14.7.

## 14.1. Estudios de campo para la obtención de información de cada ubicación

Desde una visión general, para la implementación de cualquier proyecto TIC es indispensable realizar previamente un estudio de necesidades de comunicación e información que permita definir de forma precisa los objetivos, resultados y actividades por alcanzar o realizar. En el caso particular de los proyectos que implican el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones en zonas rurales, además del estudio de necesidades, es conveniente realizar un estudio de campo que sirva para la elaboración del diseño de la red. Posteriormente, durante la ejecución de la iniciativa, es conveniente realizar un estudio exhaustivo que permita validar o complementar el diseño inicial y sirva además de base para las actividades de ingeniería de detalle.

### 14.1.1. Estudio de necesidades de comunicación e información

En la actualidad, es ampliamente aceptado que un estudio de necesidades de información y comunicación comprende, además de la identificación misma de las necesidades, un diagnóstico previo de la situación de la organización, grupo o población objetiva sobre la cual se pretende intervenir.

Para realizar el diagnóstico inicial, existen diversos métodos. En particular, el Diagnóstico Rápido Participativo (DRP) [208] es un método de investigación que busca limitar el conocimiento para la intervención a lo estrictamente necesario, sin que ello implique la pérdida de información relevante.

En relación a la identificación de necesidades, esta actividad puede ser realizada aplicando diversos métodos, siendo el objetivo final conocer la estructura y procesos de la organización o colectivo para luego identificar las necesidades reales. Como en otros casos, este es un proceso participativo cuyos resultados dependen en gran medida de la capacidad para lograr una adecuada interacción con los beneficiarios o usuarios.

Finalmente, es importante resaltar que el paso siguiente a la identificación de necesidades es la determinación de los servicios finales que se implementarán y con ello, el tipo de tecnología (apropiada) a usar para este fin.

### 14.1.2. Levantamiento de datos en terreno

El levantamiento de datos en el terreno sirve para tener una idea más completa de la zona de intervención, desde el punto de vista de ubicación geográfica, logística, transporte, telecomunicaciones, energía, etc. [209]. Antes de realizar el levantamiento de datos en el terreno se debería efectuar lo siguiente:

1. Solicitar y/o buscar la mayor cantidad de información de la zona de intervención en las instituciones involucradas directa e indirectamente en el proyecto: formas de transporte en la zona, mapas de ubicación geográfica, servicios de telecomunicación existentes, instituciones públicas existentes, etc.
2. Hacer una exploración previa, en la medida de lo posible, de la zona de intervención. Actualmente existen diversas formas: mediante el uso de mapas cartográficos, sistemas de información geográfica como Google Earth, Google Maps y otros. Esto sirve para ubicar los puntos de interés y tener una mejor idea de la zona de intervención.
3. Hacer un plan de viaje, en el cual se definen los lugares a visitar, las rutas, tiempos, tipos de transporte y presupuesto.
4. Verificar que las personas que realizarán el viaje para el estudio se encuentren en óptimas condiciones de salud y cuenten con las vacunas necesarias para prevenir la adquisición de alguna enfermedad.
5. Preparar el equipamiento necesario para el levantamiento de información: GPS, brújula, cámara fotográfica, cámara de vídeo, computadora portátil, cinta métrica, telurómetro, navajas, catalejo, analizador de espectro portátil, material de seguridad para trabajo en altura o en selva, etc.
6. Definir un documento o formulario que permita el levantamiento de información en el terreno para cada lugar a visitar. A continuación se indican las partes que podrían incluirse en dicho documento:
  - Datos del lugar visitado: nombre de localidad, región, coordenadas geográficas, ciudades importantes cercanas. Desde el punto de vista técnico, se debe proceder a la toma de coordenadas geográficas (latitud, longitud y altura) de dos o máximo tres posibles ubicaciones para la instalación de torres (en caso de ser necesarias) y la ubicación de los establecimientos a los cuales se dará servicio. Estos datos deben ser capturados con un GPS debidamente calibrado y con un error máximo de  $\pm 10$  metros, en caso de que sea viable.
  - Servicios de telecomunicaciones existentes (recoger información cualitativa y cuantitativa). Con esto se sabrá si existen opciones de conexión a Internet en algún punto de la zona. Además, permitirá hacerse una idea de las interferencias que puede sufrir el despliegue de una u otra tecnología. Para ello se hará uso del analizador de espectro portátil. Esto es de especial importancia si se pretenden reutilizar torres de comunicaciones ya existentes, donde la interferencia puede ser mayor. En este caso, sería interesante subir

con seguridad a la torre, no sólo para conocer la interferencia, sino también para descartar la existencia de alguna obstrucción en las direcciones en las que se pretende establecer enlaces desde allí.

- Información relativa a los servicios de energía presentes en la zona, lo que servirá para el diseño del sistema de alimentación de los equipos.
- Información de transportes presentes en la zona: tipos (para pasajeros y carga), costos asociados, tiempos de recorrido, frecuencia de transporte, consumo de combustible, etc. Esta información sirve para proyectar los costos y tiempos de implementación de la red de telecomunicaciones.
- Información relativa al terreno donde se instalaría la infraestructura de telecomunicaciones: tipo de suelo, conductividad del terreno (con ayuda de un telurómetro), costo, propietario, si está cerca de algún aeropuerto, etc.
- Información relativa a los fenómenos climáticos presentes en la zona. Este dato es importante para identificar los posibles contratiempos y/o definir la mejor época de intervención para la implementación de la red de telecomunicaciones.
- Información de materia prima que se pueda conseguir cerca de la zona de intervención (cemento, hierros, arena, piedra, agua, madera, sal, etc.). Esto es útil para saber las opciones existentes en el mercado local; además se pueden disminuir los tiempos de transporte.
- Información relativa a mano de obra presente en la zona de intervención. Con esta información se pueden evaluar las posibilidades de llevar personal cualificado a la zona de intervención. Esto permitirá conocer a su vez si existe en ella alguna persona con conocimiento de comunicaciones.
- Información relativa a la seguridad frente a actos vandálicos o de violencia. Esto es importante para definir el grado de seguridad con el cual se tendría que implementar la infraestructura.
- Información de personas de contacto en las zonas de intervención, en especial de las autoridades: nombres, institución, cargo dentro de la institución, teléfonos, etc. Esto es importante para realizar coordinaciones con los representantes de cada comunidad.
- Información de instituciones presentes en la zona de intervención. Esto es importante para identificar instituciones que pudieran beneficiarse de la red de telecomunicaciones.
- Información relativa a la actividad económica de la zona de intervención.
- Incluir un campo para las fotos de los lugares de interés. Estas imágenes y los vídeos que puedan ser tomados tienen particular utilidad, pues pueden dar una clara idea de la infraestructura existente, de las características del terreno y demás datos que complementarán la información transmitida por el ingeniero de campo luego de la visita.

7. Desde el punto de vista personal y dependiendo de la zona a intervenir, preparar un botiquín con medicina para primeros auxilios, ropa adecuada, carpa portátil, bolsa de dormir, mosquitero, protección contra la lluvia y sol, etc.

Durante la visita de campo, cada vez que se llegue a un lugar de interés es importante contactar con las autoridades de la comunidad, dado que con ellos se pueden definir las posibles ubicaciones de la infraestructura de telecomunicaciones y pueden brindar información para completar el formulario de levantamiento de información; de igual forma, con dichas personas se puede identificar algún guía para desplazarse a otro lugar a pie, por río o carretera, si fuera necesario. Además, dependiendo de cómo se define el grupo de beneficiarios directos e indirectos del proyecto, este acercamiento y coordinación debe ser visto como parte del proceso de inclusión de los receptores en la formulación y ejecución del proyecto, el cual debe tener un carácter participativo.

Luego de la visita de campo se debe procesar la información obtenida para realizar el diseño de la red de telecomunicaciones, tal y como será descrito en los siguientes apartados.

## 14.2. El dimensionamiento de la red

Con los datos obtenidos en los estudios de campo se puede realizar un dimensionamiento de la capacidad requerida en la red. El dimensionamiento sirve para determinar el número de recursos que debe asignarse a una red para que puedan efectuarse en ella las comunicaciones necesarias con unas características de calidad de servicio determinadas. Para ello es necesario traducir las necesidades de comunicación e información identificadas con los beneficiarios, en requisitos de tráfico que pueda cumplir una tecnología de comunicaciones, asumiendo que la predicción del uso de la red con base en estas necesidades sólo podrá tener un grado limitado de exactitud. En cualquier caso, la red que se instale fracasará en su cometido si gran parte de la demanda no puede ser satisfecha.

Los requisitos de tráfico tendrán que ser claramente diferenciados entre aquellos requeridos para la comunicación entre nodos de la red y aquellos requeridos para la comunicación con el exterior. La combinación de ambos determinará en gran medida el diseño de la red, puesto que sólo unas pocas tecnologías podrán dar servicio a esas necesidades a un coste que se ajuste al presupuesto del proyecto. Además, los requisitos de comunicación con el exterior determinarán las características del servicio que se contratará con los Proveedores de Servicio de Internet.

De manera general, la implantación de una infraestructura de telecomunicaciones rurales en zona aislada tendrá como objetivo dar soporte tanto a telefonía como a otros servicios de comunicación. El planteamiento más sencillo será diferenciar qué necesidades hay de telefonía, y cuáles de comunicaciones para el resto de los servicios. Aunque las redes se planteen con tecnologías de datos, sobre las cuales incluso la telefonía se transporta en forma de paquetes de datos (ver Capítulo 5 acerca de la voz sobre IP, VoIP), el dimensionamiento de la red resulta más sencillo haciendo esta simplificación. Si algún otro servicio de tiempo real resultara crítico (videoconferencia, algún servicio

de telediagnóstico médico, televisión, etc.) podría ser necesario estudiarlo también por separado.

### 14.2.1. Caracterización del tráfico de voz

El tráfico de voz se ha venido caracterizando tradicionalmente con las herramientas matemáticas de la teoría de colas y el teletráfico. Si bien es cierto que esta teoría fue inicialmente diseñada para sistemas de telefonía fija, se puede aplicar sin pérdida de generalidad para modelar la demanda de tráfico requerida por sistemas de VoIP.

#### 14.2.1.1. Teoría de colas

La teoría de colas es una disciplina matemática utilizada para modelar las redes de comunicación, donde varios clientes (Población) intentan acceder a un recurso (Servidor) a través de una Cola [210]. Cada uno de estos tres elementos se caracteriza estadísticamente, pero a efectos prácticos se pueden definir mediante los siguientes parámetros:

- La Población representa el número de usuarios que pueden solicitar el servicio, y se caracteriza mediante la Tasa de llegadas ( $\lambda$ ), que indica el número medio de usuarios que solicitan el servicio por unidad de tiempo, es decir, el número medio de llamadas que se intentarán realizar por unidad de tiempo.
- Los Servidores representan el número de canales<sup>4</sup> del sistema, es decir, el número de llamadas que se pueden cursar simultáneamente. Como el teletráfico fue ideado para la telefonía analógica, inicialmente un canal equivalía a una línea física, un par de cobre por el que únicamente se podía cursar una llamada a la vez. Este concepto carece de sentido en redes inalámbricas digitales, donde un enlace de datos transporta la información de múltiples llamadas; por tanto, se considerará que un canal (un servidor) representa la parte del caudal del enlace que se utiliza para cursar una llamada de voz, es decir, para cursar a la velocidad requerida los paquetes de datos que contienen la información de la llamada. Los servidores se caracterizan mediante la Tasa de servicio ( $\mu$ ), que indica el número medio de llamadas atendidas por un Servidor por unidad de tiempo.
- La Cola representa el conjunto de clientes que, habiendo intentado utilizar el Servidor, se encuentran a la espera de que quede libre. Interviene cuando el número de llegadas (demanda de un servicio) supera la capacidad del Servidor (capacidad para atender el servicio), por lo que aparecen llamadas que no se pueden atender y serán o bien guardadas en una cola a la espera de ser cursadas, o descartadas.

Para analizar las prestaciones de las redes con base en la teoría de colas existen varios parámetros que definen al sistema:

---

<sup>4</sup> Los canales que aquí se tratan son distintos a los canales radioeléctricos que se mencionan más adelante en este capítulo.

- Intensidad de Tráfico ( $A$ ), representa el número de canales permanentemente ocupados necesarios para cursar todo el tráfico. Se puede obtener como:

$$A = \lambda/\mu \quad (14.1)$$

Pese a que el resultado de esta operación es adimensional,  $A$  se mide en Erlangs.

- Factor de utilización ( $\rho$ ), que representa la probabilidad de que un servidor esté ocupado, es decir, la probabilidad de que una llamada no sea atendida por el sistema porque no hay caudal suficiente en el enlace. Toma el valor de 1 cuando la red está a su máxima capacidad.
- Caudal ( $Th$ ), es una medida de la productividad del sistema y representa el número medio de llamadas atendidas por unidad de tiempo. Se puede obtener como:

$$Th = \rho \mu C \text{ [llamadas/segundo]} \quad (14.2)$$

Siendo  $C$  el número de servidores (canales) del sistema.

- Volumen de tráfico cursado por un servidor ( $V$ ), representa el tiempo total de ocupación de ese servidor en un intervalo de tiempo de referencia ( $T$ ). Este intervalo se suele caracterizar mediante la Hora Cargada (HC), que representa la hora del día con mayor tráfico; es a partir de la Intensidad de Tráfico  $A$  a esta hora que se suele realizar el dimensionamiento. Se puede calcular como:

$$V = T A \quad (14.3)$$

La VoIP se puede caracterizar como un sistema con pérdidas y sin reintento, es decir, que si la demanda supera la capacidad de servicio, las peticiones se rechazan y se pierden. Las llamadas que no se pueden cursar inmediatamente se rechazan, de modo que no hay cola. Por lo tanto, el sistema se caracterizará con la Tasa de Llegadas  $\lambda$  y la Tasa de Servicio  $\mu$ , que permitirá conocer la Intensidad de Tráfico  $A$ .

El modelo de tráfico que estudia esta situación es el modelo de Erlang-B (ErB) y sirve para predecir lo que puede suceder en media (muchas horas con tráfico similar). Este modelo estadístico, representado en tablas, proporciona para una Intensidad de Tráfico  $A$  dada y una probabilidad de bloqueo máxima  $PB_{max}$  (probabilidad de que una llamada no pueda ser atendida), los canales de voz  $C$  que necesitará nuestro sistema. Sabiendo este valor, se podrá obtener la capacidad que requerirá cada enlace para atender a ese tráfico de red.

#### 14.2.1.2. Cálculos

Para conocer la capacidad que tendrá que ofrecer nuestro sistema, habrá que traducir las necesidades de comunicación de voz identificadas con los beneficiarios, a los parámetros manejados en la Teoría de Colas. Es decir, habrá que:

- Conocer el número de puntos que se pretenden conectar y el número de terminales en cada emplazamiento.
- Realizar una estimación previa de las llamadas que se van a realizar desde cada terminal (y con qué destino) en la hora más cargada, cuando se establezca el uso de la red. Realizarlo por separado para el tráfico interno y el externo.
- Realizar una estimación de la duración media de dichas llamadas, distinguiendo entre las llamadas internas a la red y las dirigidas al exterior.
- Estimar la probabilidad de bloqueo máxima que puedan soportar estas llamadas. El bloqueo de una llamada es la imposibilidad de cursarla porque no hay recursos disponibles en la red, y sucede cuando ya se están cursando el máximo de llamadas posibles en un momento dado y se intenta una más. La probabilidad de bloqueo podrá ser diferenciada entre tráfico interno y externo en algunas tecnologías y en otras no. Si hay razones para dar valores distintos de probabilidad de bloqueo tolerable, se puede hacer, y más tarde ya se verá si la tecnología escogida permite esa diferenciación, o bien se debe tomar la más restrictiva para todas.
- Seleccionar el códec de audio que utilizarán las aplicaciones de VoIP y su tasa de tráfico. Como se puede ver en el capítulo sobre telefonía IP, los distintos códecs tienen distintas tasas de transferencia, diferente variabilidad de ésta, y distinta sensibilidad al retardo o a la pérdida de paquetes. Al elegir el códec tenemos caracterizada la fuente de tráfico, de modo que sabemos los bits por segundo (bps) que ocupará cada llamada, es decir, la tasa de transferencia que tendrá que soportar cada canal para transmitir con garantía una llamada de voz con ese códec. A esta tasa la denominamos  $R$ .

Estos datos proporcionan la información suficiente para calcular el número de llamadas que pueden ocurrir de forma simultánea en la red durante la Hora Cargada, y por lo tanto el valor del caudal que tendrá que soportar la red en ese período. En dicho caudal confluirán llamadas que ocurran en el interior de la red, y otras que vayan al exterior. Pese a que en términos de la capacidad que debe ofrecer la red troncal ambos tipos cuentan por igual, los cálculos que se describen a continuación se realizarán para cada uno de ellos; de esta forma la suma de ambos servirá en la estimación de la red troncal, y los datos de las llamadas que van al exterior servirán para estimar la capacidad requerida en la salida a Internet.

Para realizar los cálculos, el primer paso será obtener la Intensidad del Tráfico  $A$  por cada comunicación que ocurre en un nodo. Para ello hay que:

- Obtener  $\lambda$ . Como lo que tenemos caracterizado es el número de terminales que se conectarán a un nodo de la red y el número medio de llamadas por hora que genera un terminal, si queremos  $\lambda$  en llamadas por segundo, debemos dividir entre 3.600 (los segundos de una hora).

$$\lambda = \text{número de terminales} \times \text{número de llamadas por HC} / 3.600 \quad (14.4)$$



- Obtener  $\mu$ . Como  $\mu$  representa el número medio de llamadas atendidas por unidad de tiempo, su valor se puede obtener como el inverso de la duración de cada llamada.
- Obtener  $A$  usando la Ecuación 14.1.

A continuación, con este valor de  $A$  y la Probabilidad de Bloqueo máxima  $PB_{max}$  que puede soportar cada llamada, recurriremos a las tablas de Erlang B para obtener el número de canales  $C$  necesarios. Existen páginas Web donde se pueden introducir estos valores, que calculan automáticamente el valor de  $C^5$ .

Conocido el número de canales  $C$  y la tasa  $R$  que ha de soportar cada uno de ellos, podemos calcular la capacidad necesaria en cada enlace para un sentido de la comunicación. Como las llamadas de voz son bidireccionales, la capacidad obtenida habrá que multiplicarla por 2.

$$CE = 2 C R [bps] \quad (14.5)$$

Donde CE: Capacidad del Enlace.

Hay que tener en cuenta que los tráficos de todos los terminales de cada nodo se agregarán en la Hora Cargada en los enlaces troncales, por los que estos tendrán que soportar el caudal de todos los nodos anteriores. Por esta razón, en función del número y la ubicación de los terminales, la capacidad a soportar por los enlaces troncales cambiará.

En las redes en que fueran críticos y relevantes otros servicios de tiempo real duro tales como videoconferencia, monitorización en tiempo real de señales biológicas, etc., podría ser necesario darles un tratamiento similar al de la voz a fin de garantizar la disponibilidad de recursos suficientes para dichos servicios.

### 14.2.2. Caracterización del tráfico de datos

El tráfico de datos puede ser de distintos tipos: navegación, correo electrónico, vídeo bajo demanda, etc. Este tráfico está encaminado en su mayoría al exterior de la red, por lo que tendrá que ser tenido en cuenta tanto en los enlaces de la red troncal, como al determinar las características de la salida a Internet de la red.

En los casos en que un servicio pueda ser caracterizado de forma similar a como hemos hecho para la voz, se le podrá dar un tratamiento también similar. No obstante, lo habitual con tráficos elásticos es considerarlos de forma agregada y con una filosofía *best-effort*, es decir, hacerlo lo mejor posible para satisfacer las demandas dentro de lo razonable, pero sin garantías. Para simplificarlo se recurrirá a adjudicarle un porcentaje del ancho de banda contratado en la salida o salidas a Internet. El dimensionamiento de esta capacidad necesaria para el tráfico elástico suele hacerse estimando las necesidades

<sup>5</sup><http://www.erlang.com/calculator/erlb/>

de velocidad percibida por cada usuario, y reutilizando el ancho de banda un cierto número de veces, teniendo en cuenta que no todos los usuarios trabajan a la vez, ni un usuario activo está generando tráfico todo el tiempo.

### 14.2.3. Determinación de las salidas a Internet

La caracterización del tráfico de voz y datos hacia o desde el exterior de la red, permite conocer cuál es el ancho de banda que se ha de contratar con el Proveedor de Servicios de Internet. En función de estos requisitos y de los precios ofrecidos, se decidirá el número de salidas de la red. Se recomienda, si el presupuesto lo permite, contar con más de una, puesto que esto proporcionará cierta redundancia en la salida.

Los proveedores normalmente calculan una "tasa de reutilización" a la hora de ofrecer un servicio; cada Mbps que tienen a la salida, lo "revenden" cierta cantidad de veces, estimada de forma empírica según la tasa de uso simultáneo del ancho de banda que experimentan. Se consideran aceptables valores de tasa de reutilización de 1:25 a 1:50, dependiendo del precio y de la calidad de ese ancho de banda; es decir, a mayor calidad de dicha salida, mayor tasa de reuso podrá ser considerada. Como se decía en el apartado anterior, la lógica de la reutilización se basa en el hecho de que un usuario puede necesitar un cierto ancho de banda cuando trabaja, pero ni trabaja todo el tiempo ni genera tráfico durante todo el tiempo que trabaja. La tasa de reutilización del ancho de banda es diferente en función del escenario y los tipos de usuarios, por lo que conviene hacer un estudio lo más cuidadoso posible de la tasa que es aplicable en cada situación. Una vez estimada esa tasa de reutilización máxima para nuestro caso, es conveniente conocer o estimar la que ya usa el proveedor de acceso a Internet para poder dimensionar la capacidad que debemos contratar.

Como ejemplo de lo anterior, supongamos que el acceso a Internet por una red de 40 terminales es a través de un operador de ADSL con el que tomamos una conexión de usuario que luego repartimos para toda la red que estamos diseñando. El operador ADSL reutiliza la banda con un ratio 1:50 y nosotros estamos dispuestos a aceptar 1:100 para cada usuario. Debemos saber entonces que la capacidad percibida por cada usuario será del orden de 20 veces inferior a la ofrecida por el proveedor. En cambio, si conectamos a Internet por una línea dedicada que nos garantiza el 100 % del ancho de banda (y que nos cobrará también en consecuencia), cada usuario percibiría probablemente todo el ancho de banda de la línea de forma general.

En cuanto a los criterios sobre dónde ubicar dichas salidas:

- En las redes en zonas rurales desfavorecidas, muchas veces algún punto de salida a Internet viene condicionado por lo existente. Si un punto de la red es el único próximo a un núcleo urbano, probablemente sea ese el punto en el que se puede conseguir una conexión a Internet más económica y de mayores prestaciones.
- En caso de desearse utilizar más de una salida a Internet, es conveniente ubicarlas en puntos que permitan balancear la carga de los enlaces de la red siempre que sea posible.

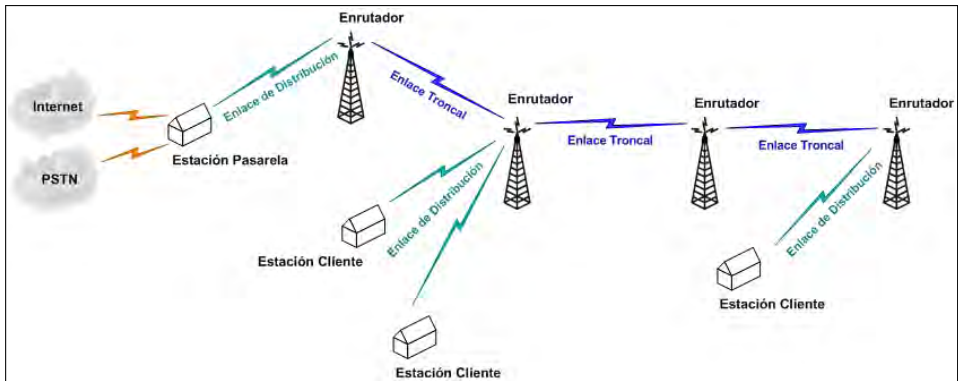


Figura 14.1.: Ejemplo de topología de red.

- Otro criterio a considerar es la facilidad de acceso al lugar donde se instale, ya que un lugar más accesible reducirá los tiempos de indisponibilidad en caso de que ocurra alguna incidencia, y reducirá posiblemente los costes de mantenimiento.
- Por último, un criterio frecuente es situar el acceso a Internet lo más próximo posible a los puntos cuya comunicación con el exterior es más crítica, para disminuir la sensibilidad de esa comunicación frente a fallas de la red que va a ser desplegada.

Con el número de salidas definido, se podrá saber la capacidad requerida para cada enlace de la troncal y pasar a la etapa de estudio de viabilidad de la red.

### 14.3. El estudio de viabilidad de la red

Conocidas las necesidades de comunicación, identificada el área de intervención y adquiridos los datos georeferenciados de toda la zona donde se desplegará la red, se debe proceder al diseño de la misma. Esto se puede realizar incluso de forma previa a la visita de campo descrita en el apartado 14.1.1, siempre y cuando se cuente con datos fiables de la ubicación de los puntos a interconectar.

Los resultados de este diseño permitirán identificar las mejores ubicaciones posibles de los nodos de la red troncal. Éstos se comunicarán entre sí para retransmitir la señal hasta alcanzar la salida a Internet más cercana, y a su vez contarán con un enlace de acceso (o distribución) hacia los establecimientos a conectar para proporcionarles los servicios esperados, tal y como se muestra en la Figura 14.1.

En esta sección se explican los pasos para determinar la viabilidad de enlazar los nodos que conforman la red troncal. En la mayoría de los casos el enlace de distribución suele ser bastante sencillo; sin embargo, en el caso de que se tengan dudas sobre su viabilidad, se recomienda seguir el mismo procedimiento para estudiarla.

Un diseño preliminar permitirá tener un primer presupuesto de la infraestructura y equipamiento necesarios para lograr los radioenlaces requeridos en toda la red. Esta

información es de suma importancia desde los puntos de vista técnico y financiero, para una primera toma de decisiones a nivel de ingeniería en el proyecto. El siguiente paso es la validación en campo de los resultados obtenidos en este primer diseño. Conforme el equipo de campo va recopilando la información, deberá ir validando cada uno de los radioenlaces en un proceso que podemos llamar “diseño en campo de la red”. Esto permitirá optimizar la ubicación y por ende los costos de la infraestructura de las estaciones simuladas.

Luego del estudio de campo se procederá a realizar una revisión total del diseño de la red en el laboratorio. Para ello se debe volver a procesar toda la información recopilada en la visita de campo, sin descartar ninguna de las posibles ubicaciones registradas. Este proceso concluirá con la elaboración del informe de estudio de factibilidad de la red.

### 14.3.1. Preselección de las tecnologías candidatas

La información recogida en la visita de campo, junto con el dimensionamiento del tráfico requerido en la red, permite realizar una preselección de las tecnologías candidatas para el despliegue de esta.

Dado que existen límites en el presupuesto que hacen desaconsejable el uso de tecnologías en bandas licenciadas, y por tanto se presupone el uso de equipo que opere en bandas no licenciadas, los requisitos de tráfico de los usuarios permitirán realizar una primera criba en el caso de que requieran comunicaciones de banda ancha. Esto reduce las opciones posibles a las alternativas de comunicación descritas en este libro: Wi-Fi, WiMAX y las tecnologías propietarias que son mezcla de ambas.

Además, a través de los datos obtenidos en el terreno se conocerá si hay alguna banda de frecuencias con tantas interferencias que se desaconseje su uso, o si existen repuestos o conocimiento local sobre alguna de las tecnologías que permiten ofrecer los requisitos de tráfico obtenidos, lo que reducirá aún más el número de tecnologías utilizables en el diseño.

Desde el punto de vista de la propagación, es preferible utilizar la banda de frecuencias de 2,4 GHz a la de 5 GHz para la red troncal, ya que esta última, al usar un rango de frecuencias superior, está expuesta a mayores pérdidas por atenuación. Sin embargo, dado que por norma general puede haber más redes en 2,4 GHz, se recomienda el uso de la banda de 5 GHz; esta recomendación es más relevante aún en entornos con cierta contaminación electromagnética (núcleos urbanos fundamentalmente). Este hecho también ha motivado que los fabricantes de equipos especializados en comunicaciones rurales estén incluyendo sus últimos avances tecnológicos únicamente en sus equipos de 5 GHz, lo que hace que se justifique aún más la utilización de esta banda.

Las tecnologías resultantes y su banda de operación serán las que se utilicen en la planificación de radiofrecuencias y en la simulación de las redes, de forma que se pueda obtener la tecnología que mejores características ofrezca para cubrir las necesidades planteadas por los potenciales usuarios de la misma, manteniéndose dentro del presupuesto que el proyecto dedica a la red de comunicaciones.

### 14.3.2. Planificación de radiofrecuencia

Para el cálculo de los radioenlaces existen múltiples programas [211], pero el más utilizado es Radio Mobile, una aplicación de libre distribución para diseño, que puede descargarse de Internet<sup>6</sup>. Este programa permite evaluar si es posible un radioenlace entre dos estaciones remotas en un determinado rango de frecuencia, considerando diferentes factores geográficos, climáticos y estadísticos.


Radio Mobile usa el modelo de predicción de propagación del Instituto para las Ciencias de Telecomunicaciones de los Estados Unidos de América, llamado modelo Longley-Rice, y los perfiles geográficos de la zona en estudio. Éstos últimos se obtienen empleando una base de datos de elevaciones a través de mapas digitales como SRTM, DTED, GTOPO30, GLOBE o BIL.

El modelo Longley-Rice es un método de predicción troposférica para transmisión de radio sobre terreno irregular en enlaces de largo-medio alcance. Tiene en cuenta las pérdidas de espacio libre, que se producen por la degradación de la señal con la distancia, así como las pérdidas por difracción, causadas por el tipo de obstáculos que se encuentran en el trayecto. De acuerdo a este modelo de propagación se permite la simulación de radio-enlaces entre 20 MHz y 40 GHz y longitudes de trayecto entre 1 y 2.000 Km.

Radio Mobile, a su vez, permite utilizar para el cálculo de estos enlaces datos reales obtenidos de las hojas técnicas de los equipos preseleccionados, tales como potencias de transmisión y sensibilidad de los radios, y los patrones de radiación y ganancias de las antenas. De esta forma los resultados obtenidos no sólo indicarán la viabilidad o no de un enlace, sino también con qué equipos sería éste viable. Además, admite fijar en los mapas utilizados las coordenadas obtenidas mediante GPS de los lugares involucrados en el despliegue y modificar la altura a la que se colocarán las antenas en dichas ubicaciones. De esta forma se conoce la altura mínima de las torres que hace posible establecer un determinado enlace.

#### 14.3.2.1. Ejemplo de cálculo de un radioenlace

A continuación desarrollaremos un ejemplo práctico de cálculo de un radioenlace:

1. Se ingresa a Radio Mobile mediante el icono , con lo cual aparece una ventana como la que se muestra en la Figura 14.2 donde se indica la versión del mismo. En el caso del ejemplo corresponde a la versión 10.4.5.
2. Para crear un nuevo archivo de diseño de redes inalámbricas, se ingresa a Archivo → Nuevas redes, donde aparecerá una ventana similar a la mostrada en la Figura 14.3, en la que podremos configurar los parámetros iniciales.

Esta ventana nos indica lo siguiente:

- Número de redes que vamos a crear.

<sup>6</sup><http://www.cplus.org/rmw/english1.html>



Figura 14.2.: Ventana de presentación de Radio Mobile.

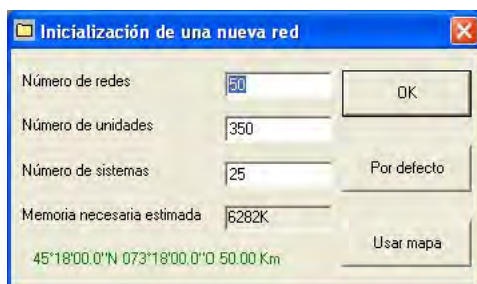



Figura 14.3.: Ventana de creación de una nueva red.

- Número de unidades. Se refiere a la cantidad de nodos que conformarán las distintas redes que deseamos simular.
  - Número de sistemas. Se refiere al detalle de las características de los equipos de radio que deseamos simular.
  - Según la magnitud de nuestro diseño elegimos las cantidades que nos convengan, registrando siempre un número mayor al de nodos previstos en la red para dejar lugar a nodos auxiliares que pueden ayudar en el diseño.
3. A continuación se configuran las Propiedades del mapa. Pulsando en el icono , el programa muestra una ventana similar a la de la Figura 14.4.

En esta ventana, entre otros, se pueden configurar los siguientes parámetros:

**Centro:** Ingresar la media aritmética de las coordenadas de los dos nodos del radioenlace a simular. El programa facilita este cálculo permitiendo utilizar la posición del cursor en el mapa como centro del mismo, mediante el botón "Usar posición del cursor". Esto, además, facilitará la posterior revisión del diseño por parte de un segundo diseñador.

**Tamaño (Km):** Es una escala que indica la longitud del Alto del mapa escogido. El área deberá cubrir la ubicación de los dos nodos del radioenlace en estudio.

**Tamaño (píxel):** Los mapas digitales con mayor resolución para América Latina son los SRTM 3 v4, que cuentan con una resolución horizontal de 3




Figura 14.4.: Ventana de configuración de las propiedades del mapa.

segundos de arco (aproximadamente 92,8 m). Por lo tanto, para obtener un mapa que se ajuste a esta escala, el tamaño en píxeles tiene que ser un múltiplo de este valor. Para ello se debe dividir el dato de Alto ingresado en el parámetro anterior en metros, entre 92,8.

**Fuente de datos de altitud:** Se debe ingresar el tipo de mapa y la ruta del directorio donde se encuentran almacenados los archivos de los mapas en el computador. Por lo general los mapas más utilizados son los SRTM3 v4 que se pueden descargar de la siguiente dirección: <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

Los datos ingresados en la Figura 14.4, devuelven un mapa como el mostrado en la Figura 14.5, que corresponde a la selección del mapa para la simulación del radioenlace Balsapuerto–Varadero (Loreto, Perú) cuyas coordenadas geográficas son:

Ítem	Nodo	Latitud	Longitud
01	Balsapuerto	-5.834667	-76.559360
02	Varadero	-5.713350	-76.410650

- Creación de unidades de transmisión y recepción, comúnmente llamados nodos. Seleccionar Propiedades de las unidades (icono ) , que abrirá una ventana como la mostrada en la Figura 14.6.

En esta ventana, entre otros, se pueden configurar los siguientes parámetros por cada una de las unidades:

**Nombre:** Hay que asignar un nombre a la unidad creada; generalmente se les llama como la institución o localidad donde se ubicará la estación de radio.

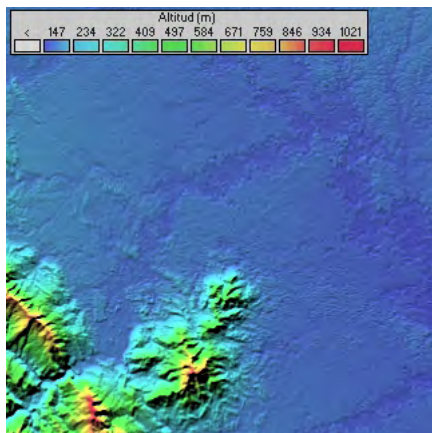


Figura 14.5.: Ejemplo de Mapa de Elevación Digital.

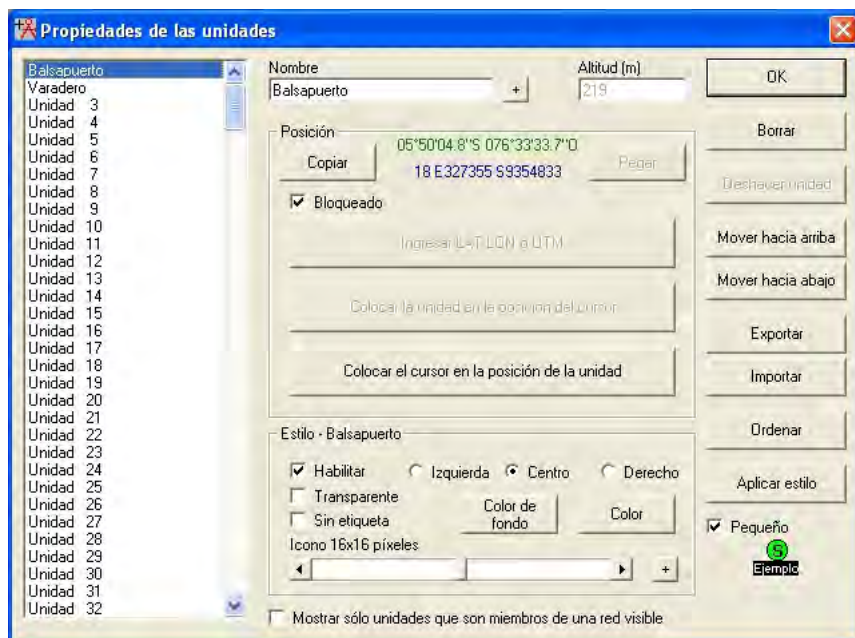


Figura 14.6.: Ventana de Propiedades de las unidades.






Figura 14.7.: Ventana para ingresar las coordenadas de un nodo.

**Posición:** En el campo de posición, pulsando en la opción “Ingresar LAT LON o UTM”, se pueden ingresar las coordenadas del nodo, tal y como muestra la Figura 14.7. Elegir la primera opción para ingresar las coordenadas del nodo registradas a través de un GPS. Las unidades aparecerán en el mapa, tal y como se muestra en la Figura 14.8.

**Altitud (m):** Una vez ingresadas las coordenadas del nodo, el programa realiza la lectura de la altura del punto geográfico y la muestra en el recuadro Altitud (m). Sin embargo, es muy probable que la ubicación introducida no corresponda exactamente con el punto de intersección entre la latitud y longitud de los datos SRTM, que es donde éstos tienen datos de altitud. Por ello, el desarrollador de Radio Mobile creó una matriz adicional para promediar los puntos intermedios. Para capturar todo el detalle de dicha base de datos hay que introducir las coordenadas de la unidad viendo el mapa con el menor alto que podamos (es posible hasta 500 m) y bloquear la altura obtenida.

Es muy probable que la altitud que muestre el programa para ese punto sea distinta a la obtenida mediante GPS. Sin embargo, no se recomienda introducir manualmente esta altitud puesto que el resto de puntos a lo largo del enlace cuentan con la altitud de los mapas SRTM, y por lo tanto si se introdujera el valor de GPS existiría un desequilibrio entre los extremos y el vano que desvirtuaría el análisis realizado.

**Estilo:** En este campo se puede personalizar el icono de la unidad.

5. En este punto ya se está en disposición de crear un enlace punto a punto entre ambos nodos, lo cual Radio Mobile denomina Red. Para crear una Red, se debe seleccionar la opción Propiedades de las redes, en el icono .

En la pestaña Parámetros, mostrada en la Figura 14.9, se debe introducir el nombre de la red (enlace), el rango de frecuencia en el que vamos a desarrollar la simulación, el tipo de polarización, el modo estadístico, el clima y las características del terreno.

Los valores sugeridos para los parámetros de la superficie del terreno se muestran en la Tabla 14.1.

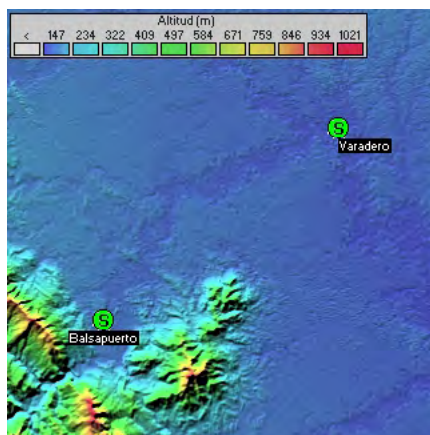


Figura 14.8.: Mapa de ejemplo con unidades posicionadas.

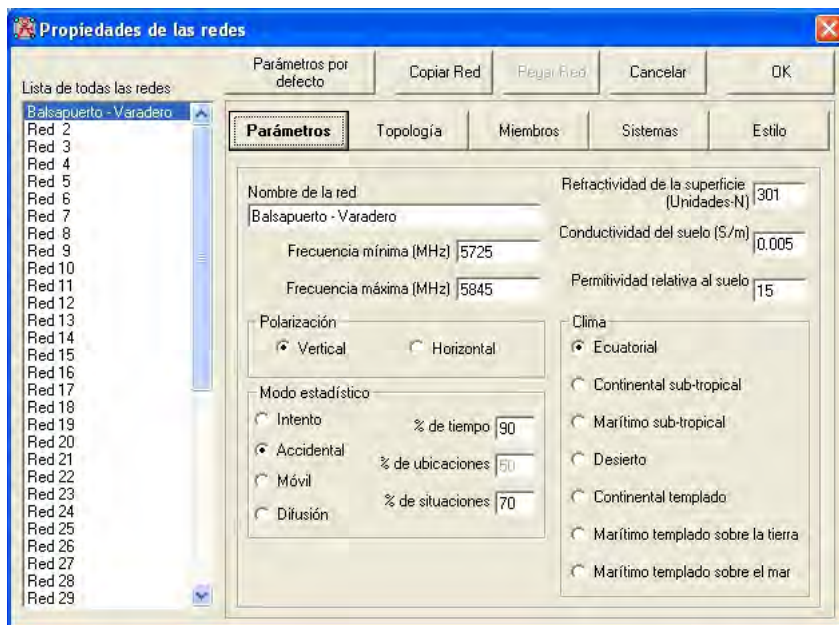


Figura 14.9.: Ventana para la introducción de los parámetros de un enlace.

Característica del terreno	Conductividad del terreno	Permitividad relativa
Terreno promedio	0,005	15
Terreno árido	0,001	4
Buen terreno	0,02	25
Agua dulce	0,01	25
Agua de mar	5	25

Tabla 14.1.: Valores recomendados para caracterizar el terreno.

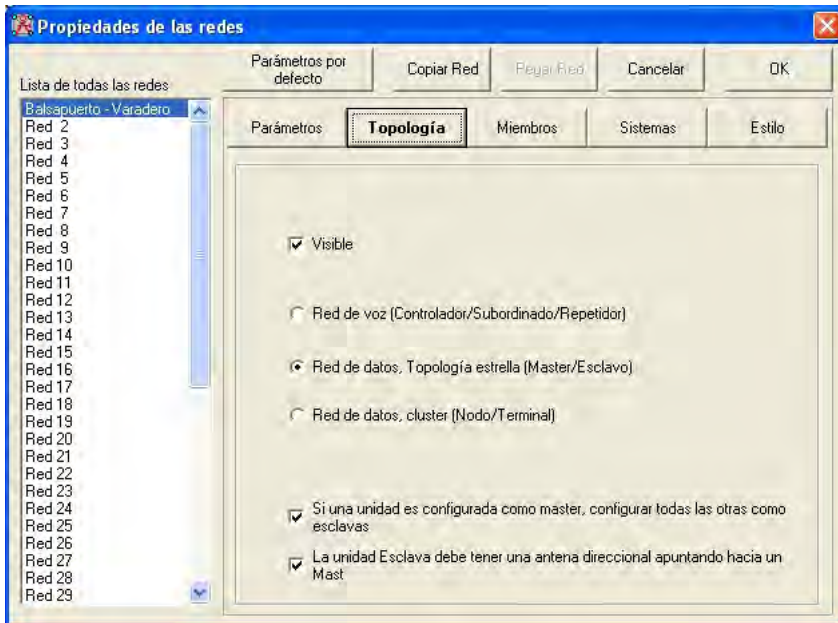


Figura 14.10.: Ventana para la configuración de la topología de un enlace.

Respecto al modo estadístico, seleccionamos la opción Accidental dado que las ubicaciones de los dos nodos son puntos fijos [212]. Los valores para el % de tiempo: 90, y % de situaciones: 70, son los recomendados para el diseño de radioenlaces en selva baja y se basan en la experiencia de las redes diseñadas. Para una comparación más exhaustiva al respecto, se recomienda consultar [212].

En la pestaña Topología, tal y como se muestra en la Figura 14.10, aparecen 3 opciones:

- Red de voz (Controlador/Subordinado/Repetidor).
- Red de datos con topología en estrella, donde existe un máster como concentrador y los demás son esclavos o clientes. Este es el caso recomendado para las simulaciones de enlace punto a punto o punto multipunto.
- Red de datos por agrupaciones (*cluster*), donde existen nodos y terminales.

En la pestaña Miembros se seleccionarán las estaciones o unidades que forman parte de esta red (aparecerán automáticamente aquellas introducidas en el *paso 4*), tal y como se puede observar en la Figura 14.11. Así mismo, se debe indicar el rol que desempeñará el nodo (Máster/Esclavo), el sistema a usar en cada estación (que se explicará a continuación) y la dirección de la antena.

En la pestaña Sistemas se realizará la configuración de los sistemas inalámbricos disponibles en la red. En la Figura 14.12 se muestra un ejemplo. Los sistemas en el Radio Mobile representan al conjunto de equipos de telecomunicaciones seleccionados que funcionarán en las instalaciones, incluyendo radio, antenas

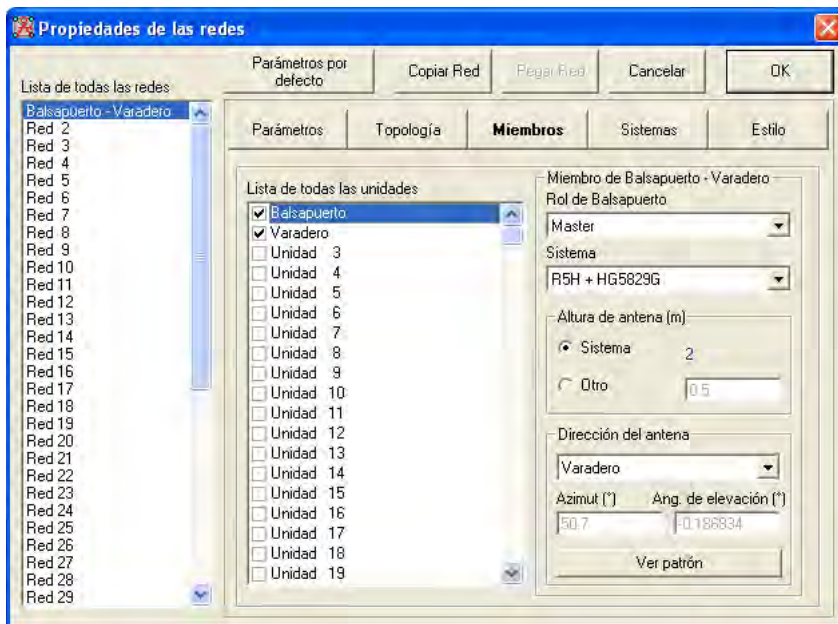



Figura 14.11.: Ventana de configuración de los miembros de un enlace.

y torres. Los datos para configurar estos sistemas son obtenidos de las hojas técnicas de los equipos. A esto hay que añadir las pérdidas de línea introducidas por conectores y otros elementos pasivos, y las que se producen por utilizar cables coaxiales de gran longitud. Las pérdidas de línea se consideran en torno a 3 dB, e incluyen las pérdidas en la longitud del cable coaxial si éste no es muy largo<sup>7</sup>. Para añadir cada sistema creado a la lista debemos hacer clic en “Agregar a Radiosys.dat”. Se recomienda tener una entrada por cada esquema de modulación de cada sistema inalámbrico que se simule, ya que, como los parámetros de potencia de transmisión y sensibilidad son distintos para cada uno de ellos, permitirá utilizar los datos del esquema de modulación mínimo que ofrece los requisitos de comunicaciones establecidos en el apartado 14.2.1.

6. Para observar los parámetros del enlace elegimos la opción “Enlace de radio” o el icono , que lanzará una ventana similar a la mostrada en la Figura 14.13. Para que en ese enlace se tenga la misma resolución que en el mapa observado, y por lo tanto se tengan en cuenta todos los puntos del mapa que existen entre ambos extremos, será necesario modificar el número de registros que considera el modelo de propagación. Esto se realiza en la pestaña “Datos de Altitud” del menú Opciones. Dado que, como se ha explicado, la resolución máxima es de 92,8 m, se podrá configurar el número de registros para toda la red si se calcula el número de registros que requiere el enlace más largo de la red (en todos los demás la resolución será menor a 92,8). Para ello habrá que dividir dicha

<sup>7</sup>Para una discusión en mayor profundidad sobre el tamaño óptimo de los cables coaxiales, consultar la Sección 14.4.

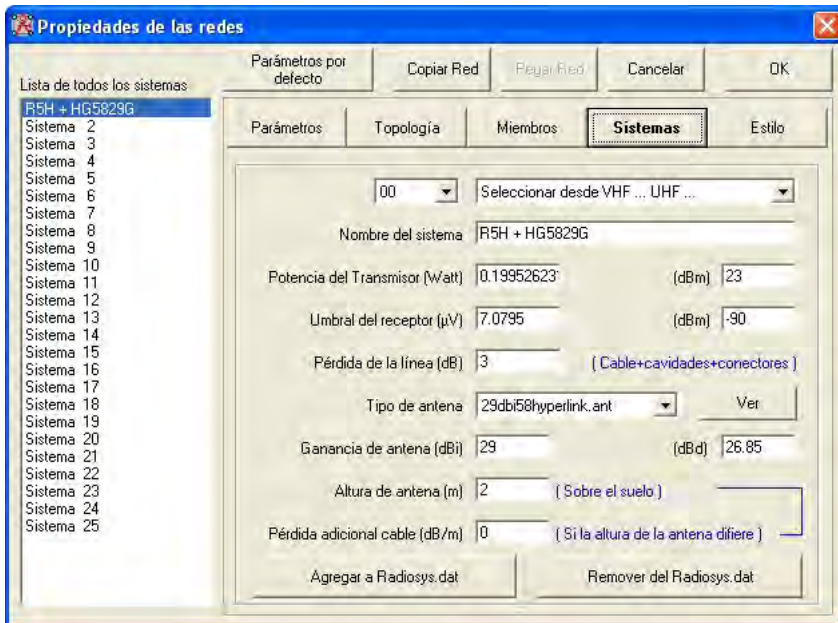


Figura 14.12.: Ventana de configuración de los Sistemas.

distancia entre 92,8.

#### 14.3.2.2. Recomendaciones para la planificación de enlaces y redes

Al ingresar la información para comprobar la viabilidad de un enlace, se obtendrá una imagen parecida a la que muestra la Figura 14.13. En esta Figura, los parámetros más relevantes a considerar para determinar si el enlace es viable o no, son los valores de Rx Relativo y Peor Fresnel:

- Para obtener un buen diseño se deben simular los enlaces con al menos de 15 dB de Rx Relativo, debido a que los resultados obtenidos en el Radio Mobile son teóricos y se debe tener un margen de sobre-dimensionamiento por factores no previstos (condiciones climáticas, desvanecimiento, etc.).
- Los enlaces deberán tener, además, visión radioeléctrica directa, algo que se consigue con un despeje mayor al 60 % del radio de la primera zona de Fresnel. Es decir, el valor de Peor Fresnel ha de ser superior a 0,6F1.

En conclusión, para evaluar el presupuesto de potencia de un radio enlace debemos conocer las características del equipamiento que estamos utilizando y evaluar la pérdida en el trayecto. Hay que recordar que si se utilizan radios diferentes en cada lado del enlace, se deben realizar los cálculos del presupuesto de potencia en ambas direcciones del enlace.

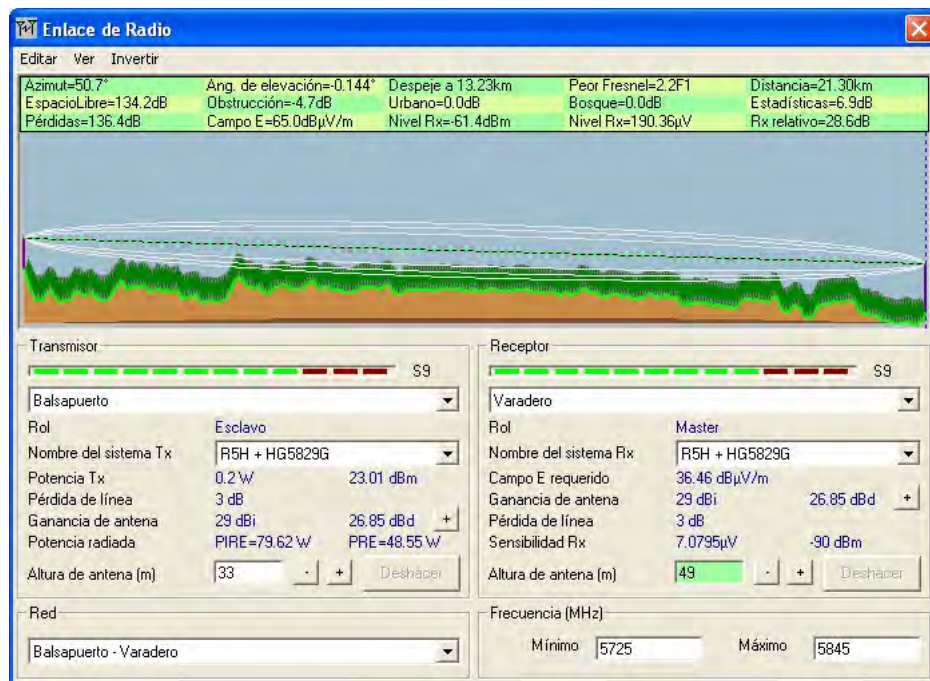


Figura 14.13.: Ventana ejemplo del resultado de un enlace.

En el caso de no obtener los valores de sensibilidad y potencia de transmisión que permitan una modulación con una tasa de tráfico suficiente para dar servicio a los requisitos obtenidos en la Sección 14.2, se deberá modificar primero la altura de la antena; y si con alturas muy elevadas no se consiguen los valores requeridos, hay que estudiar la posibilidad de utilizar unidades repetidoras intermedias. Los límites de altura de antenas a considerar son relativamente subjetivos; se pueden tener en cuenta factores tales como la disponibilidad de alturas naturales que eviten la instalación de torres, el impacto visual que se pueda o se quiera tener sobre el paisaje, y sobre todo, el costo de las infraestructuras de soporte. En el Capítulo 16 que trata de la instalación de la red se puede profundizar más en este asunto.

Pese a que en ocasiones los repetidores intermedios son la única solución para dotar de conectividad a una estación aislada, su ubicación ha de ser seleccionada cuidadosamente. Los repetidores tendrán que ubicarse en lugares accesibles, para facilitar su instalación y mantenimiento, y, siempre que sea posible, dentro de una población, para dotar de una mayor seguridad física a los mismos. Además, para maximizar dicha seguridad y ampliar los beneficios de la infraestructura desplegada, se planteará la posibilidad de brindar acceso a algún punto de esa localidad.

Se dan casos en los que no es viable dar conectividad a una estación muy aislada, ya sea porque no existe línea de vista entre los puntos, porque no existen ubicaciones para repetidores intermedios que cumplan las condiciones mencionadas, o porque el número necesario de éstos es muy alto y por lo tanto el coste de dotar de conectividad a dicha

estación no es asumible por el proyecto. En estos casos habrá que plantear soluciones alternativas, como dotarlas de una conexión satelital, y en el peor de los casos dejar estos establecimientos fuera por inviabilidad. Pese a que siempre se preferirá tener redes homogéneas debido a la eficiencia del mantenimiento y la gestión de la red, ejemplos como el anterior demuestran que no siempre es posible.

Además, la decisión de no incluir un nodo previamente previsto tiene implicaciones en todo el diseño. El tráfico requerido es menor, por lo que se podrán utilizar modulaciones con mejor sensibilidad, lo que a su vez mejorará el balance de enlace y hará que se pueda reducir el tamaño de las torres.

También se preferirá, siempre que sea posible, que existan enlaces redundantes en la red. Sin embargo, habitualmente el presupuesto no lo permite, por lo que habrá que asumir a la hora de diseñar el plan de mantenimiento las consecuencias que esto pueda suponer. Quizás no se tenga redundancia, ni se cubran todos los requisitos de tráfico, pero al menos se tendrá constancia de ello y se podrán tomar medidas para reducir su impacto.

Por último, cuando en un nodo se requiera la instalación de más de un sistema de comunicaciones, habrá que tener adicionalmente las siguientes consideraciones:

- Habrá que mantener una separación de al menos dos metros de altura entre las antenas de cada enlace para evitar la interferencia entre ellas. El sentido de esta separación, que dependerá de la frecuencia, es que las antenas disten *varias* longitudes de onda. Esto ha de ser tenido en cuenta porque puede aumentar el tamaño de la torre.
- Se podrán tener varios sistemas en cascada (conectados por Ethernet) siempre que todas las interfaces de radio de un mismo emplazamiento operen en canales no interferentes. Se asume que se pueden emplear hasta 3 canales no interferentes en la banda de 2,4 GHz y al menos 8 más en la de 5 GHz.
- El uso de canales teóricamente sin solape en un mismo emplazamiento debe ser tomado con mucho cuidado. Los transmisores de radio no son perfectos, transmiten siempre una potencia marginal fuera de la banda de trabajo, y esta puede ser suficiente como para enmascarar las débiles señales recibidas en el mismo emplazamiento desde una posición lejana, aunque sea por un canal supuestamente “no interferente”. Es posible hacer algunos cálculos preventivos con los balances de enlace, los diagramas de radiación de las antenas y las distancias, pero lo más seguro y más sencillo son las medidas. Es conveniente emplear un analizador de espectros para visualizar el espectro de señal recibido por una antena y verificar que, en el canal de trabajo, no se recibe un nivel de ruido o interferencia que vaya a ser potencialmente perjudicial. Esto se puede hacer al inicio, y es recomendable para diagnosticar futuros problemas ocasionados por interferencias. Hay algunas medidas que pueden mejorar el aislamiento entre antenas en un mismo emplazamiento:
  - Separarlas todo lo posible en el eje vertical.
  - Evitar que una antena tenga un lóbulo de su diagrama de radiación en la dirección en que se encuentra otra.



- Usar, si es posible, polarizaciones ortogonales. Si una antena usa polarización vertical y la otra horizontal, su interferencia mutua se reducirá notablemente (por supuesto, la polarización tiene que ser la misma entre una antena y la antena lejana con la que ésta se comunica).

### 14.3.3. Simulación de redes

Realizado el estudio de cobertura radioeléctrica de los nodos que la red requiere conectar, se puede comenzar el diseño de la misma. Un estudio como el explicado en el paso anterior, realizado correctamente, determina, ya sea mediante conexión directa o haciendo uso de repetidores intermedios, cómo conectar los nodos requeridos para que las ondas electromagnéticas puedan propagarse hasta su destino con una calidad suficiente como para garantizar la viabilidad física de los enlaces. Además, gracias a la planificación realizada, este análisis indicará si en dichos enlaces se podrán utilizar modulaciones que permitan cumplir los requisitos de tráfico obtenidos del estudio de necesidades. Sin embargo, hay otros factores adicionales a los requisitos de tráfico, como el retardo o el *jitter* que sufrirán las comunicaciones, que en un diseño óptimo han de ser analizados previamente si se quieren garantizar unos determinados valores en la red diseñada.

La simulación de redes suele ser una valiosa herramienta para la investigación y desarrollo de nuevos protocolos y sistemas de comunicación, pero a la vez es un instrumento extremadamente útil para el despliegue de redes reales. Una simulación, pese a sus limitaciones, permite estimar con un buen compromiso entre coste, complejidad y fidelidad, las prestaciones de una red antes de su instalación. Por lo tanto, la simulación de la red diseñada mostrará si los enlaces radioeléctricos obtenidos permiten el correcto funcionamiento de las aplicaciones requeridas, o si por el contrario, existen cuellos de botella en algún punto y es necesario rediseñar la red. El principal obstáculo con el que se topan los proyectos con presupuestos restringidos es el alto coste de las aplicaciones comerciales de simulación y despliegue de redes, básicamente debido a que éstas están dirigidas a las grandes operadoras de telecomunicaciones. Por suerte, existe un gran número de simuladores de red disponibles de uso libre y gratuito (al menos para fines académicos), entre los cuales destacan especialmente cuatro: NCTUns, OMNeT++, ns-2 y ns-3. Estos son simuladores de eventos discretos que representan a un sistema como una secuencia cronológica de eventos; cada uno de estos eventos, que sucede en un momento determinado, marca un cambio de estado en el sistema (un ejemplo de evento es el envío de un paquete). Durante la simulación se genera un conjunto de ficheros que una vez procesados permiten extraer parámetros para estimar las prestaciones de la red.

En [211] se realiza una comparación exhaustiva de los cuatro simuladores mencionados arriba, con el objeto de establecer su adecuación a las características de las redes rurales de largas distancias, tanto en la selva como en la sierra, considerando aspectos como el soporte a los protocolos de comunicaciones Wi-Fi y WiMAX y nodos multi-interfaz, al igual que otros criterios como las características de la comunidad que soporta el programa, garante de su mantenimiento a futuro, o la posibilidad de modificarlos para adaptarlos a las características específicas de redes como las planteadas en este libro.



Dado que la valoración recibida por el proyecto ns-3 es muy superior, resulta recomendable su uso en el medio y largo plazo, desplazando a un simulador como ns-2, con el que se ha venido trabajando pero que resulta farragoso, opaco y heterogéneo en su código, y además está al final de su ciclo de vida. Tras realizar los primeros análisis de prestaciones de redes con ns3 se constató su gran modularidad, lo cual permite flexibilidad en su desarrollo y mayor facilidad para integrar satisfactoriamente futuras aportaciones (tanto internas como externas), pero al mismo tiempo se comprobó su inmadurez. Por consiguiente, pese a reconocer los beneficios que supondría su uso en la simulación de las redes consideradas en este libro, se debe esperar una evolución de ns3 que le permita alcanzar una mayor confiabilidad en sus resultados. Cuando se haya consolidado esa evolución, se elaborarían recomendaciones para llevar a cabo un proceso óptimo de simulación de dichas redes.

## 14.4. Diseño final de la red

El estudio de viabilidad de la red indicará si existe alguna tecnología que permita ofrecer los requisitos de tráfico obtenidos tras el análisis de necesidades de comunicación. En el caso de que hubiera más de una tecnología, habría que decidir de forma justificada cuál de ellas será la que definitivamente se despliegue. Entre los factores que pueden determinar esta elección se encuentran el coste de los equipos, la facilidad de conseguirlos en el país, su consumo eléctrico, etc.

Para la tecnología que finalmente se seleccione, el estudio de viabilidad entregará las características de los equipos de comunicaciones requeridos en cada nodo. Esta información será la base para la selección de los equipos disponibles en el mercado.

El estudio de viabilidad además aportará información sobre algunos de los parámetros a configurar en los equipos para que brinden las prestaciones esperadas. En función del número de enlaces que se establezcan en cada nodo, y de las interferencias que previamente pudieran existir en la zona, se realizará la planificación de frecuencias en la red de forma que en cada nodo se utilicen frecuencias no interferentes. Además del número y tipo de canales, el estudio nos revelará el ancho de banda de cada canal a utilizar y las modulaciones mínimas que deben configurarse.

Por último, el estudio entregará la ubicación final de las torres, su altura mínima, y la altura a la que deberán ir colocadas las antenas pertenecientes a cada enlace. Además, tal como se puede observar en la Figura 14.13, para cada nodo se podrá conocer el azimut y el ángulo de elevación de cada antena a instalar en la torre, datos imprescindibles a la hora de la instalación.

## 14.5. Configuraciones de dispositivos

El diseño de la red no puede considerarse completo sin que se llegue a proponer la configuración completa de todos los dispositivos cuya adquisición se ha planteado.

En primer lugar, cada dispositivo, para brindar las prestaciones que se han considerado necesarias en el diseño propuesto, tendrá que tener una configuración particular (parámetros de radio, potencia de transmisión, modo de funcionamiento, protocolos habilitados/deshabilitados, mecanismos opcionales, frecuencia de trabajo, parámetros de acceso al medio, etc.). Aquí no podemos ser más precisos porque todo esto dependerá de la tecnología y del producto escogido.

En segundo lugar, al estar hablando de manera general de infraestructuras de redes de datos que van a transportar paquetes IP, tenemos que realizar un plan de direccionamiento y un plan de encaminamiento. Ambos están emparentados, y aunque excede el objetivo de este libro entrar en detalles sobre cómo hacer estos planes, es útil clarificar algunos puntos:

- Los enlaces de comunicaciones inalámbricas de muchas tecnologías pueden operar en una de dos formas: modo *bridge* y modo *router*. El estar en un modo u otro tiene implicaciones directas en cómo debemos asignar direcciones a los dispositivos.
- Cuando se opera en modo *router*, cada nodo es considerado por la red tras él como la pasarela para acceder a la parte de la red que queda al otro lado. En este modo es muy importante diseñar bien el plan de encaminamiento, aunque la creación real de las rutas de red en los dispositivos es mejor dejarla al cuidado de un protocolo de encaminamiento dinámico.
- Cuando se opera en modo *bridge*, un enlace (considerando por tal al par de sistemas de radiocomunicaciones que conectan entre sí) se puede considerar transparente a nivel de red, es decir, equivalente a un cable de red.

Los planes de direccionamiento y encaminamiento de paquetes de toda la red deben tener en cuenta al conjunto de la red diseñada y la ubicación de las salidas a Internet. El diseño no se podrá considerar completo si no incluye todas las configuraciones para que los dispositivos, al ser conectados por cables y radioenlaces, ofrezcan un medio de conmutación de paquetes extremo a extremo entre puntos de la red o entre éstos y cualquier punto de Internet (suponiendo que la red se conecta a Internet a través de algún punto).

## 14.6. Validación participativa del diseño de la red

Dependiendo del contexto y las características del despliegue de infraestructura a realizar, puede ser necesario realizar una validación del diseño elaborado. Esto es conveniente especialmente en proyectos TIC de cooperación para el desarrollo y otras iniciativas que buscan beneficiar a organizaciones o colectivos sin tener fines comerciales. Para entender esta necesidad, se debe tener en cuenta que estos proyectos contemplan la implementación de tecnologías apropiadas, siendo uno de sus pilares la participación de los beneficiarios en todas las instancias del proceso (Figuras 14.14 y 14.15), el cual debe responder a las reales necesidades y expectativas de los mismos. De acuerdo con lo anterior, para estos casos resulta muy conveniente socializar el diseño de la red y los



Figura 14.14.: Taller de diseño participativo en el distrito de Pillpinto (Perú).



Figura 14.15.: Taller de diseño participativo en el distrito de Acos (Perú).

servicios ante el receptor y futuro usuario de los mismos, recibiendo su realimentación y teniendo abierta la posibilidad de realizar modificaciones producto de esta interacción. Esta validación participativa no sólo ayuda a integrar a los beneficiarios en el proyecto, sino que también significa un acuerdo que permite una adecuada comprensión de los alcances del despliegue de la red y sus servicios, evitando la generación de sobre-expectativas en cuanto a la cobertura o resultados finales.

## 14.7. Listado de materiales, planos y presupuesto estimado

Luego de llevar a cabo todos los puntos anteriores de la metodología, se dispone ya de información para hacer un inventario de los materiales necesarios para la instalación y

un presupuesto. Para hacer este presupuesto de forma sencilla, puede ser útil una hoja de cálculo que tenga en las filas todos los posibles elementos a adquirir (idealmente clasificados por algún criterio facilitador) y en las columnas los precios unitarios y los emplazamientos. Esto permite calcular fácilmente cuántas unidades de cada elemento se deben adquirir, así como el coste de cada partida, el coste de cada emplazamiento y el coste total de la infraestructura diseñada. Cuando hay dos o más tecnologías candidatas y no se ha podido establecer hasta este punto cuál es la idónea, este puede ser el momento de tomar la decisión con base en el coste total y el coste por emplazamiento (de cara a la futura extensión de la red).

Otro resultado tangible del proceso de diseño es la documentación. Todo el diseño debe quedar debidamente documentado, incluida la documentación gráfica (planos) que permita garantizar el montaje según se requiera, la información de configuración, etc. Aunque no fuera el caso, siempre se debe pensar que los responsables de realizar compras, montaje, pruebas, operación y mantenimiento de la nueva infraestructura son totalmente ajenos a quienes la han diseñado, por lo que toda la información necesaria para realizar esas tareas según el diseño realizado debe quedar bien recogida, sistematizada y presentada. Se aportarán los planos de instalación de todos los sistemas implicados en cada nodo, indicando claramente cómo conectar y dónde, cada uno de los cables del sistema. En la Figura 14.16 se muestra como ejemplo el plano de un nodo intermedio de la red troncal y en la Figura 14.17 el de una estación cliente.

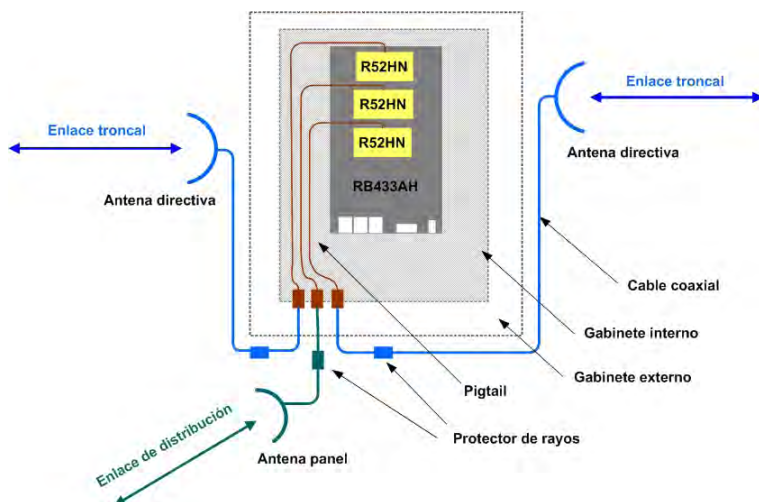


Figura 14.16.: Plano de conexión de un repetidor intermedio.

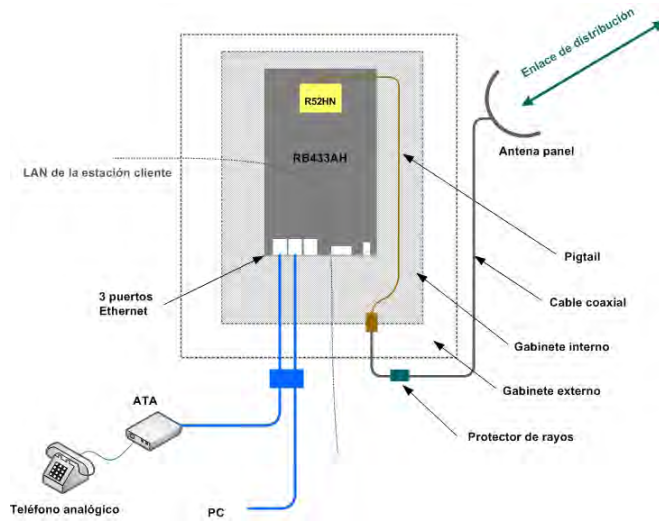


Figura 14.17.: Plano de conexión de una estación cliente.