

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R M.1768-1
(04/2013)

**Metodología de cálculo de las necesidades
de espectro del componente terrenal
de las telecomunicaciones
móviles internacionales**

Serie M

**Servicios móviles, de radiodeterminación,
de aficionados y otros servicios
por satélite conexos**



Prólogo

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

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

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

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

Series de las Recomendaciones UIT-R

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

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

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

Publicación electrónica
Ginebra, 2014

© UIT 2014

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

RECOMENDACIÓN UIT-R M.1768-1

Metodología de cálculo de las necesidades de espectro del componente terrenal de las telecomunicaciones móviles internacionales

(2006-2013)

Cometido

Esta Recomendación describe un método de cálculo para la estimación de las necesidades de espectro terrenal de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT).

Presenta un enfoque sistemático, que integra diversas categorías de servicio (combinación de tipos de servicio y clases de tráfico), entornos de servicio (combinación de pautas de utilización del servicio y teledensidad), entornos radioeléctricos, análisis de datos de mercado y estimación del tráfico sobre la base de tales categorías y entornos, la distribución del tráfico por grupos de técnicas de acceso radioeléctrico (GTAR), el cálculo de capacidad requerida del sistema y la determinación de las necesidades de espectro que de ello se deducen. El método es aplicable al tráfico de conmutación de paquetes y permite alojar múltiples servicios. También puede acomodar tráfico de emulación de conmutación de circuitos gracias a un concepto de reserva.

1 Recomendaciones e Informes relacionados

- Recomendación UIT-R M.1390 – *Metodología para el cálculo de las necesidades de espectro terrenal de las telecomunicaciones móviles internacionales 2000 (IMT-2000).*
- Recomendación UIT-R M.1457 – *Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas de las telecomunicaciones móviles internacionales-2000 (IMT-2000).*
- Recomendación UIT-R M.1645 – *Marco y objetivos generales del desarrollo futuro de las IMT-2000 y de los sistemas posteriores.*
- Recomendación UIT-R M.2012 – *Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas terrenales de las telecomunicaciones móviles internacionales-avanzadas (IMT-Avanzadas).*
- Informe UIT-R M.2038 – *Tendencias de la tecnología.*
- Informe UIT-R M.2072 – *World mobile telecommunication market forecast.*
- Informe UIT-R M.2074 – *Radio aspects for the terrestrial component of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000.*
- Informe UIT-R M.2243 – *Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for International Mobile Telecommunications.*

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que los grupos de técnicas de acceso radioeléctrico (GTAR) apropiadas para las IMT pueden dar lugar a necesidades diferentes de anchura de banda de canal y, por consiguiente, repercutir de manera diversa en las posibilidades básicas de utilización de las frecuencias;
- b) que la metodología descrita en el Anexo 1 se considera suficientemente flexible para responder tanto a las necesidades mundiales como a las necesidades específicas de los mercados regionales en lo que tiene que ver con las necesidades de espectro terrenal;
- c) que es cada vez mayor la convergencia y el interfuncionamiento de servicios en las redes fijas, móviles y de radiodifusión;
- d) que el mercado de telecomunicaciones en su conjunto tendrá a disposición medios de comunicación diversos en lo que se refiere a servicios y redes, de conformidad con las Recomendaciones UIT-R M.1645, UIT-R M.1457 y UIT-R M.2012;
- dbis*) que para determinar las necesidades de espectro de las IMT, se han elaborado nuevos requisitos de mercado e hipótesis de implantación de redes, que se han tenido en cuenta en el Informe UIT-R M.2243;
- e) que otros mecanismos de entrega pueden soportar algunas aplicaciones de usuario en común y cursar su respectivo tráfico;
- f) que ha de tenerse en cuenta la distribución del tráfico a los demás GTAR pertinentes;
- g) que la Resolución 233 (CMR-12) invita al UIT-R a estudiar las necesidades adicionales de espectro de las IMT;
- h) que, por consiguiente, sólo deberían calcularse las necesidades de espectro para los GTAR relacionados con las IMT;
- j) que toda metodología para el cálculo de las necesidades de espectro de las IMT debe:
 - i) acomodar las capacidades descritas en las Recomendaciones UIT-R M.1645, UIT-R M.1457 y UIT-R M.2012;
 - ii) admitir toda la compleja combinación de servicios, que requerirán anchuras de banda diferentes y diferentes cualidades de servicio, así como velocidades binarias superiores a las de IMT-2000;
 - iii) tener la capacidad de modelar sistemas de múltiples redes interconectadas y contar con la flexibilidad necesaria para manejar diferentes combinaciones de GTAR en entornos diferentes, así como la posibilidad de proveer enlaces ascendentes y descendentes de un servicio sobre la base de diferentes técnicas de acceso radioeléctrico (RAT);
 - iv) emplear los datos de mercado que convenga reunir, como datos de entrada para la previsión del tráfico;
 - v) ser lo suficientemente flexible para responder, tanto a las tecnologías emergentes como a las ampliaciones de las IMT;
 - vi) tener en cuenta factores relacionados con las realizaciones prácticas de la red;
 - vii) producir resultados de suerte que sean de fácil comprensión y creíbles;
 - viii) poderse aplicar y verificar dentro de las escalas de tiempo disponibles;
 - ix) convenir a las necesidades de las reuniones del UIT-R, en relación con las instalaciones de informática necesarias y el tiempo requerido para efectuar un análisis;

- x) ser menos complejos de lo que se justifica por la incertidumbre de los datos de entrada;
- xi) tener en cuenta la mejora de la eficacia espectral como resultado de los avances tecnológicos introducidos en el perfeccionamiento de las IMT,

reconociendo

- a) que la mayor parte del tráfico ha pasado de las comunicaciones vocales a las comunicaciones multimedios;
- b) que se diseñan redes y sistemas capaces de transferir a bajo costo paquetes de datos;
- c) que aumenta la diversidad de los servicios y será menos pertinente aplicar valores máximos de tráfico simples a diferentes entornos, zonas geográficas y unidades de tiempo,

recomienda

1 que las administraciones que deseen estimar las necesidades de espectro del componente terrenal de las IMT utilicen la metodología que figura en el Anexo 1.

NOTA – Esta metodología es general y puede emplearse en diferentes mercados, para diversas arquitecturas de sistemas celulares. Ha de prestarse atención a la elección de los parámetros de entrada para responder a las necesidades específicas de cada país o región.

Anexo 1

1 Introducción

En el pasado, se consideraba la estimación de las necesidades de espectro de las aplicaciones inalámbricas como un marco especializado en un solo sistema y una sola situación de mercado. Al producirse la convergencia de las telecomunicaciones móviles y fijas y los entornos con múltiples redes y atributos de soporte, tales como el interfuncionamiento sin discontinuidad entre diferentes sistemas de acceso complementarios que se describe en las Recomendaciones UIT-R M.1645, UIT-R M.1457 y UIT-R M.2012 ya no conviene aplicar un enfoque tan simple. Para estimar las necesidades de frecuencias, hay que elaborar y aplicar nuevos modelos que tengan en cuenta las correlaciones espaciales y temporales entre los servicios de telecomunicación, teniendo en consideración las necesidades de mercado y las situaciones particulares de implantación de las redes.

2 Información previa necesaria para la aplicación de la metodología

2.1 Previsiones de servicio y mercado

El punto de partida para todas las consideraciones de espectro relativas a las IMT consiste en las expectativas de mercado para los servicios de comunicación inalámbrica. Lo decisivo en este sentido es la previsión del mercado para usuarios de las IMT. La metodología se ha diseñado para tener en cuenta una amplia variedad de aplicaciones. El formato requerido de la información de mercado se define en el § 3.5. Un ejemplo de información de mercado adecuada en dicho formato figura en el Informe UIT-R M.2072 y la información actualizada del mercado de las IMT puede encontrarse en el Informe UIT-R M.2243.

2.2 Consideraciones técnicas

La metodología adopta un enfoque tecnológicamente neutral en los estudios RAT y emplea la clasificación de GTAR del Informe UIT-R M.2074. La metodología de cálculo del espectro requiere parámetros técnicos característicos para los diferentes GTAR como datos iniciales para el cálculo del espectro. Gracias al método de grupos de técnicas de acceso, la consideración técnica de la estimación del espectro puede efectuarse fácilmente sin referirse a la especificación detallada de interfaces de radiocomunicación para los sistemas móviles, actuales y futuros. En la consideración técnica figuran las definiciones de estos grupos, así como los parámetros de radiocomunicación vinculados a los mismos, que se utilizan en las diferentes etapas de la metodología. Estos aspectos tecnológicos de radiocomunicación y los valores correspondientes de los parámetros radioeléctricos, tales como eficacia espectral, se han examinado y se describen en el Informe UIT-R M.2074.

2.3 GTAR

La metodología tiene en cuenta el mercado total de comunicaciones terrenales por suministrar mediante diversos medios de comunicación para otros tantos a servicios y redes, de conformidad con las Recomendaciones UIT-R M.1645, UIT-R M.1457 y UIT-R M.2012. Es así que puede identificarse el número de GTAR. La presente metodología distribuye el tráfico total previsto del mercado de comunicaciones terrenales entre los distintos GTAR como sigue:

Grupo 1: Sistemas anteriores a las IMT, IMT-2000 y sus ampliaciones.

Este grupo comprende los sistemas móviles celulares digitales, sistemas de las IMT-2000 y sus respectivas ampliaciones.

Grupo 2: Sistemas IMT-Avanzadas, tal como se describen en la Recomendación UIT-R M.2012.

Grupo 3: LAN de radiocomunicación existentes y sus ampliaciones.

Grupo 4: Sistemas radiodifusión móvil digital y sus ampliaciones.

3 Metodología de cálculo de las necesidades de espectro

3.1 Alcance de la metodología de cálculo del espectro para las IMT

Esta metodología tiene en cuenta las previsiones de tráfico para todos los GTAR (GTAR1 – GTAR4), aunque sólo calcula las necesidades de espectro de GTAR1 y GTAR2, que corresponden a los sistemas IMT.

3.2 Criterios del cálculo del espectro

El proceso técnico de estimación de las necesidades de espectro para las comunicaciones móviles ha de basarse en cuatro elementos esenciales:

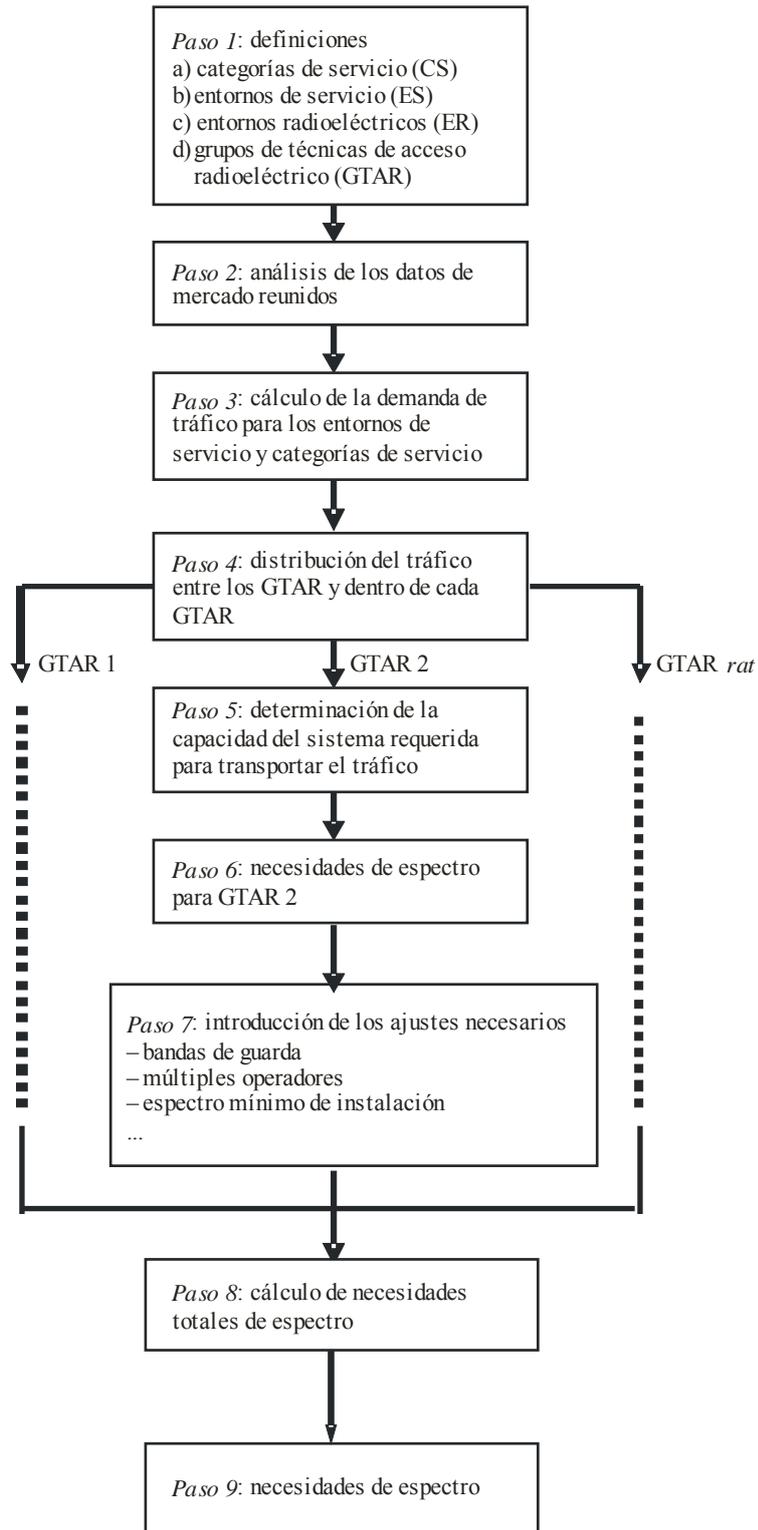
- Definición de servicios.
- Expectativas del mercado.
- Marco técnico y operacional.
- Algoritmo del cálculo de espectro.

3.3 Secuencia general de la metodología

Un flujograma general de la metodología de cálculo de las necesidades de espectro aparece en la Fig. 1.

FIGURA 1

Flujograma de la metodología general de cálculo de espectro



Paso 1: presenta las diversas definiciones empleadas en la metodología, que se exponen en el § 3.4.

Paso 2: analiza los datos del mercado, que pueden obtenerse de los Informes UIT-R M.2072 y UIT-R M.2243. Los datos de análisis de mercado se describen en el § 3.5.

Paso 3: calcula los valores correspondientes al tráfico para la metodología según el procedimiento descrito en el § 3.5.2.6.

Paso 4: distribuye el tráfico entre los distintos GTAR y entornos radioeléctricos dentro de cada GTAR, tal como se presenta en el § 3.6.

Paso 5: determina la capacidad requerida del sistema a los efectos de transportar el tráfico ofrecido. Los algoritmos de cálculo de capacidad se presentan separadamente para las categorías de servicio con conmutación de circuito y con conmutación de paquetes, respectivamente en § 4.1 y § 4.2.

Paso 6: calcula las necesidades de espectro del GTAR 1 y del GTAR 2, según se describe en el § 4.3.

Paso 7: establece algunos ajustes necesarios para tener en cuenta aspectos prácticos de la implantación de redes, según se describe en el § 5.

Paso 8: calcula las necesidades de espectro totales, según el § 6.

Paso 9: presenta las necesidades de espectro de GTAR 1 y GTAR 2 a modo de resultado.

3.4 Definiciones

Aquí se definen todos los parámetros de entrada necesarios y sus respectivas clasificaciones.

Los puntos que siguen contienen cuadros con los parámetros que necesita la metodología. Los valores de los parámetros indicados en los cuadros deben considerarse como ejemplos, según se indica en dichos cuadros.

Primero se presentan los tipos de servicio y clases de tráfico, para contemplar las probables velocidades máximas de datos de las que se dispone y el perfil de tráfico probable de un servicio. La categoría de servicio es una combinación de tipo de servicio y clase de tráfico.

Los entornos de servicio se definen con el objeto de clasificar la zona donde se encuentra el usuario en el momento de evaluarse un servicio y un perfil de tráfico dados en dicha zona geográfica. Los entornos de servicio son una combinación de las características de utilización del servicio y valores de teledensidad.

La definición de entorno radioeléctrico tiene por objeto contemplar en los cálculos la infraestructura radioeléctrica que suministra los servicios al usuario en un entorno de servicio. En los entornos radioeléctricos se tienen en cuenta las distintas concepciones de implantación de las radiocomunicaciones.

Los diversos GTAR recogen aspectos más amplios del mercado de comunicaciones terrenales con el que se cuenta para suministrar los servicios.

3.4.1 Categorías de servicio (CS)

Una categoría de servicio (CS) es una combinación de tipo de servicio y clase de tráfico, según se ilustra en el Cuadro 1.

CUADRO 1
Clasificación de los servicios

Clase de tráfico Tipo de servicio	Conversacional	Flujo continuo	Interactivo	Segundo plano
Multimedios de súper alta velocidad	CS1	CS6	CS11	CS16
Multimedios de alta velocidad	CS2	CS7	CS12	CS17
Multimedios de media velocidad	CS3	CS8	CS13	CS18
Datos y multimedios de baja velocidad	CS4	CS9	CS14	CS19
Datos de muy baja velocidad ⁽¹⁾	CS5	CS10	CS15	CS20

⁽¹⁾ Comprende voz y SMS.

3.4.1.1 Tipos de servicio

Las velocidades binarias máximas se utilizan para clasificar los tipos de servicio; es posible reunir servicios que requieren velocidades de datos similares en una categoría común. Los servicios se clasifican en los cinco tipos de servicio del Cuadro 2.

CUADRO 2
Tipos de servicio y sus respectivas velocidades binarias máximas

Tipo de servicio	Velocidad binaria máxima
Datos de muy baja velocidad	< 16 kbit/s
Datos de baja velocidad y multimedios de baja velocidad	< 144 kbit/s
Multimedios de media velocidad	< 2 Mbit/s
Multimedios de alta velocidad	< 30 Mbit/s
Multimedios de súper alta velocidad	30 Mbit/s a 100 Mbit/s/1 Gbit/s

a) Datos de muy baja velocidad

Este tipo de servicio requiere velocidades binarias máximas de hasta 16 kbit/s. A partir de 2010, existirá una demanda de estas aplicaciones de muy bajas velocidades de datos para servicios de voz y mensajes simples. Además, también se prevén en esta categoría ciertas aplicaciones en el campo de la comunicación por sensores y/o telemetría de datos de baja velocidad binaria, caracterizadas por su ubicuidad.

b) Datos y multimedios de baja velocidad

Este tipo de servicio soporta velocidades de datos de hasta 144 kbit/s. Tiene en cuenta las aplicaciones de comunicaciones de datos anteriores a las IMT-2000.

c) Multimedios de media velocidad

Este tipo de servicio soporta una velocidad binaria máxima de hasta 2 Mbit/s. Será necesario para mantener la compatibilidad con las aplicaciones IMT-2000.

d) *Multimedios de alta velocidad*

Este tipo de servicio aloja aplicaciones de alta velocidad de datos, entre ellas servicios de flujo continuo de vídeo en multimedios, suministrados con un servicio xDSL en sistemas de comunicación fija por cable.

e) *Multimedios de súper alta velocidad*

En este tipo de servicio se encuadran las aplicaciones multimedios de súper alta velocidad de datos, que funcionan actualmente en los servicios FTTH (fibra hasta el hogar) en el caso de sistemas de comunicación por cable.

3.4.1.2 Clases de tráfico

La metodología utiliza las clases de tráfico de la Recomendación UIT-R M.1079, en la cual se definen cuatro clases de calidad de servicio (QoS) para las IMT-2000 desde el punto de vista del usuario:

- clase de servicio conversacional;
- clase de servicio interactivo;
- clase de servicio de flujo continuo;
- clase de servicio en segundo plano.

El principal factor que distingue entre sí a estas clases es el grado de sensibilidad al retardo que presenta la aplicación: la clase conversacional se refiere a aplicaciones muy sensibles al retardo, mientras que la QoS en segundo plano es la que menos se ve afectada por el retardo.

Para las clases de tráfico que se basan en la Recomendación UIT-R M.1079, las clases conversacional y de flujo continuo se suministran mediante conmutación de circuitos, mientras que las clases de segundo plano e interactiva utilizan la conmutación de paquetes.

a) *Clase conversacional*

La forma más conocida de este sistema es la conversación telefónica. Sin embargo, con la existencia de Internet y los multimedios, diversas nuevas aplicaciones van a necesitar este sistema, por ejemplo VoIP (protocolo de transmisión de voz por Internet) y herramientas de videoconferencia. La conversación en tiempo real tiene lugar siempre entre pares (o grupos) de usuarios finales vivos (humanos). El sistema de conversación en tiempo real está caracterizado por un tiempo de transferencia, que debe ser reducido, debido a los siguientes motivos:

- la forma de diálogo que presenta el sistema;
- al mismo tiempo, la relación (variación) temporal entre las entidades de información del flujo debe conservarse en el mismo sentido que los flujos en tiempo real.

El retardo máximo admitido de transferencia está definido por la percepción humana de la conversación en vídeo y audio. Por consiguiente, el límite de retardo de transferencia admisible es muy riguroso, puesto que todo fracaso en reducir al mínimo el retardo de transferencia puede traer aparejada una disminución inaceptable de la calidad. Por consiguiente, los requisitos en materia de retardo de transferencia producen cifras considerablemente inferiores y más exigentes que los retardos generalmente aceptados en las aplicaciones interactivas.

b) *Clase interactiva*

Esta forma se aplica cuando el usuario final, que tanto puede ser una persona como una máquina, solicita en línea datos de un equipo distante (por ejemplo, un servidor). Ejemplos de interacción humana con equipos distantes son: la búsqueda en la web, la recuperación de bases de datos, el acceso a un servidor. Ejemplos de interacción mecánica con equipos distantes son: la participación en registros de medida y la investigación automática de bases de datos (aparatos telemáticos).

El tráfico interactivo constituye la otra forma de comunicación clásica de datos caracterizada por lo general por el elemento de respuesta a solicitudes del usuario final. En el destino del mensaje hay una entidad que espera el mensaje (respuesta) dentro de un cierto plazo. El tiempo de retardo de todo el procedimiento suele ser, por consiguiente, un atributo esencial. Otra característica es que el contenido de los paquetes ha de transferirse de forma transparente (bajas reglas de codificación básica).

Tráfico interactivo – características fundamentales a los efectos de determinar la QoS:

- elemento de respuesta a una solicitud;
- conservación del contenido de carga útil.

c) *Clase de flujo continuo*

Cuando el usuario mira (escucha) un programa de vídeo (audio) en tiempo real, se aplica el sistema de flujos en tiempo real. Un flujo de datos en tiempo real se dirige siempre a un destino vivo (humano). Se trata de un transporte en sentido único.

Este sistema es uno de los nuevos participantes en la comunicación de datos y da lugar a un cierto número de nuevas necesidades en materia de sistemas de telecomunicación y de transferencia de datos. Lo caracterizan relaciones (variaciones) temporales entre entidades de información (muestras, paquetes) dentro de un flujo que debe preservarse, si bien no presenta requisitos especiales en cuanto a retardos mínimos de transferencia.

Debe limitarse la variación del retardo del flujo de extremo a extremo, a fin de preservar la relación (variación) temporal entre las entidades de información de la corriente. Pero puesto que la corriente se alinea generalmente en el extremo receptor (el equipo del usuario), la variación máxima admitida de retardo en el curso del medio de transmisión está dada por la capacidad de la función de alineación de la aplicación en el tiempo. La variación de retardo admitida es, por consiguiente, mucho mayor que la variación de retardo determinada por los límites de la percepción humana.

Flujos en tiempo real – características fundamentales para la QoS:

- flujo continuo unidireccional;
- preservación de la relación (variación) temporal entre entidades de información de la corriente.

d) *Clase de segundo plano*

Este sistema viene al caso cuando el usuario final, generalmente una computadora, envía y recibe ficheros de datos en segundo plano. Son ejemplos de ello la entrega en segundo plano de correo electrónico, SMS, la carga de bases de datos y la recepción de registros de medida.

El tráfico de segundo plano es una de las formas de comunicación clásica de datos cuyo nivel general se caracteriza por la ausencia de un parámetro en el punto de destino que espera recibir los datos dentro de un cierto límite de tiempo, salvo un retardo demasiado prolongado, ya que los datos no tienen ninguna utilidad práctica si se reciben demasiado tarde. Por lo tanto, el sistema es relativamente insensible respecto del tiempo de entrega. Otra característica es que el contenido de los paquetes debe transferirse de manera transparente (bajas reglas de codificación básica).

Tráfico de segundo plano – características fundamentales para la QoS:

- el punto de destino no espera la llegada de los datos dentro de un cierto límite de tiempo;
- conservación del contenido de carga útil.

Una aplicación de segundo plano es aquella que no transmite información de retardo. En principio, el único requisito para las aplicaciones de esta categoría es que la información debe llegar al usuario

esencialmente sin errores. No obstante se señala que siempre existe cierta limitación del retardo, ya que los datos dejan de tener utilidad efectiva para su uso práctico si se reciben demasiado tarde.

5.4.1.3 Parámetros de categoría de servicio

Caracterizan a las categorías de servicio parámetros que se obtienen a partir de estudios efectuados en el mercado o de otras fuentes. Los siguientes parámetros se han extraído del Informe UIT-R M.2072:

- Densidad de usuarios (usuarios/km²).
- Velocidad de llegada de sesión por usuario (sesiones/(s · usuario)).
- Velocidad binaria media del servicio (bit/s).
- Duración media de sesión (s/sesión).
- Relación de movilidad.

Los primeros cuatro parámetros mencionados caracterizan la demanda de diversas categorías de servicio, mientras que el parámetro relativo a la movilidad se utiliza en la distribución del tráfico en el § 3.6. La movilidad terminal está íntimamente relacionada con las previsiones de utilización de la aplicación. La Recomendación UIT-R M.1390 define la movilidad en los siguientes términos:

- en interiores;
- peatonal; y
- vehicular.

Las necesidades dependen de la velocidad de las estaciones móviles. En los estudios de mercado que figuran en el Informe UIT-R M.2072, se caracteriza a las clases de movilidad como sigue:

- Estacionaria (0 km/h)
- Baja (> 0 km/h y < 4 km/h)
- Alta (> 4 km/h y < 100 km/h)
- Súper alta (>100 km/h y < 250 km/h).

Los límites de estas categorías deberían corresponder a las características típicas de las redes de radiocomunicación celular. Para células pequeñas, el tiempo mínimo que un usuario permanece en una célula entre dos fines de la comunicación debe ser considerablemente mayor que el tiempo de iniciación y ejecución del fin de la comunicación. Por consiguiente, para pequeñas células, el tamaño de la célula limita el máximo de velocidad admitida. Por tal motivo, el uso de picocélulas por lo general se limita a soportar velocidades peatonales (hasta 3-10 km/h), mientras que las microcélulas sirven para velocidades vehiculares de 50 km/h y las macrocélulas para redes de radiocomunicaciones celulares móviles que cubren el resto de las velocidades del usuario. A los efectos de aplicar las clases de movilidad en la metodología, las clases de movilidad que se deducen de los estudios de mercado se interpretan como sigue:

- Estacionaria/peatonal (0-4 km/h)
- Baja (> 4 km/h y < 50 km/h)
- Alta (> 50 km/h).

El tráfico de la clase de movilidad «alta» según los estudios de mercado se divide en clases de movilidad «baja» y «alta» a los efectos de la metodología. Esta subdivisión requiere tener en cuenta las características de los entornos de servicio considerados en el § 3.4.2, lo que puede dar lugar a diferentes factores de subdivisión J_m para m entornos de servicios diferentes. La correspondencia del tráfico respecto de las clases de movilidad se presenta en los Cuadros 3 y 4; los valores de J_m que allí figuran son sólo ejemplos.

CUADRO 3
Correspondencia de clases de movilidad

Movilidad en el estudio de mercado	Movilidad en la metodología
Estacionaria	Estacionaria/peatonal
Baja	
Alta	Baja (fracción J_m)
Súper alta	Elevada (fracción $1 - J_m$)

CUADRO 4
Ejemplos de valores J para la correspondencia de clases de movilidad en los distintos entornos de servicio

Entornos de servicio m	Valor J_m
1	1
2	1
3	1
4	1
5	0,5
6	0

Además de los parámetros de categoría de servicio relacionados con el mercado que se calculan en § 3.5.2, la metodología requiere parámetros que no figuran en el Informe UIT-R M.2072. Estos parámetros se enumeran en el Cuadro 5 y son necesarios para los cálculos de capacidad expuestos en el § 4.

CUADRO 5
Parámetros de categorías de servicio como entradas al algoritmo de cálculo del espectro

Categoría de servicio	CS1	CS2		–		CS20
Tamaño medio del paquete (bit/paquete)		–		–		
Segundo momento ⁽¹⁾ del tamaño del paquete (bit/paquete ²)		–		–		
Retardo medio del paquete admisible (s)		–		–		
Velocidad de bloqueo admisible (%)		–		–		

⁽¹⁾ El segundo momento de una variable aleatoria es un valor escalar relacionado con la varianza de la variable aleatoria.

3.4.2 Entorno de servicio (ES)

Los entornos de servicio expresan su utilización corriente y las condiciones de volumen.

El entorno de servicio (ES) se define como una combinación de las características o pautas de utilización del servicio y de la teledensidad.

3.4.2.1 Patrones de utilización del servicio

Un patrón de utilización del servicio se define con arreglo al comportamiento corriente del usuario en una zona de servicio dada.

El patrón de utilización del servicio se clasifica según la zona donde los usuarios utilizan servicios similares y esperan una calidad de servicio similar. En la metodología se utilizan los siguientes patrones de utilización del servicio:

- Hogar
- Oficina
- Lugares públicos.

3.4.2.2 Teledensidad

Según se define en la Recomendación UIT-R M.1390, la densidad de población y el número de aparatos por persona son otros tantos factores importantes para tener en cuenta al considerar los entornos del servicio. Por consiguiente, la zona geográfica se divide según estos factores en diversas categorías de teledensidad.

Caracteriza a cada parámetro de teledensidad la densidad de población y la densidad de aparatos de comunicación. El grado de teledensidad se divide como sigue:

- Urbana densa
- Suburbana
- Rural.

3.4.2.3 Definición y atributos de entornos de servicio

Se definen los entornos de servicio para combinaciones de teledensidad y pautas de utilización de servicio, según el Cuadro 6.

CUADRO 6

Identificación de entornos de servicio

Teledensidad Patrón de utilización de servicio	Urbana densa	Suburbana	Rural
Hogar	ES1	ES4	ES6
Oficina	ES2	ES5	
Lugar público	ES3		

Para dar a los lectores una visión más clara de los diferentes entornos de servicio, el Cuadro 7 presenta un posible grupo de usuarios y una aplicación típica de cada ES.

CUADRO 7

Ejemplos de grupos de usuarios y aplicaciones de entornos de servicio

	Grupos de usuarios	Aplicaciones
ES1	Particulares, usuarios comerciales	Voz, acceso a Internet, juegos, comercio electrónico, enseñanza a distancia, aplicaciones multimedios
ES2	Usuarios comerciales, empresas pequeñas y medianas	Voz, acceso a Internet, videoconferencia, comercio electrónico, aplicaciones comerciales móviles
ES3	Particulares, usuarios comerciales, usuarios de servicios públicos (por ejemplo, conductores de autobuses, servicios de emergencia), turistas, vendedores	Voz, acceso a Internet, videoconferencia, aplicaciones comerciales móviles, informaciones turísticas, comercio electrónico
ES4	Particulares, usuarios comerciales	Voz, acceso a Internet, juegos, comercio electrónico, aplicaciones multimedios, enseñanza a distancia
ES5	Particulares, empresas	Voz, acceso a Internet, comercio electrónico, videoconferencia, aplicaciones comerciales móviles
ES6	Particulares, explotaciones agrícolas, usuarios de servicios públicos	Voz, aplicaciones de información

Hay que calcular por separado las diferentes necesidades de espectro para cada teledensidad. Las necesidades finales de espectro se calculan teniendo en cuenta los valores máximos de necesidades del espectro para las tres zonas de teledensidad (densa urbana, suburbana y rural).

3.4.3 Entorno radioeléctrico (ER)

Los entornos radioeléctricos (ER) se definen mediante capas de células en una red compuesta de capas de células jerárquicas, es decir, macrocélulas, microcélulas, picocélulas y células de punto caliente. La metodología utiliza la superficie de las células de los diferentes entornos radioeléctricos como entradas para los cálculos. La superficie de las células repercute directamente en las necesidades de espectro que dependen del volumen de tráfico. Naturalmente, ha de hallarse un compromiso entre los costos de instalación de la red y las necesidades espectrales. Además de los límites dimensionales relacionados con estos dos factores, existen también límites técnicos. El límite técnico superior tiene que ver con las condiciones de propagación, limitaciones de potencia de transmisión de los terminales y, en menor medida, la difusión del retardo.

Determinan los límites inferiores del tamaño de las células un aumento de las condiciones de interferencia desfavorables, por ejemplo, la aparición frecuente de obstáculos visibles entre células que producen interferencia. Se supone que el límite inferior es despreciable en comparación con el límite que imponen los costos de instalación.

Como la implantación de microcélulas, picocélulas y células de punto caliente no varía mucho entre las diferentes zonas de teledensidad, se supone que pueden utilizarse en el método de cálculo del espectro las mismas zonas de célula «máximas» para dichas capas de células. No obstante, para las macrocélulas la situación es diferente, ya que la teledensidad repercute en la superficie de la célula destinataria, al igual que en las instalaciones de estaciones de base. De ahí que la superficie de las macrocélulas dependa de la teledensidad en el cálculo de las necesidades de espectro. En el Cuadro 8 se definen ejemplos de superficies de célula máximas para cada entorno radioeléctrico y teledensidad. Los valores de superficie de célula son valores característicos para las teledensidades consideradas.

CUADRO 8

Ejemplos de superficie de célula máxima de entorno radioeléctrico/km²*

Entorno radioeléctrico	Teledensidad		
	Densa urbana	Suburbana	Rural
Macro célula	0,65	1,5	8,0
Micro célula ⁽¹⁾	0,1	0,1	0,1
Pico célula ⁽¹⁾	1,6E-3	1,6E-3	1,6E-3
Células de punto caliente ⁽¹⁾	6,5E-5	6,5E-5	6,5E-5

* Se supone que el tamaño de célula en estos entornos no depende de la teledensidad.

⁽¹⁾ Este ejemplo no se aplica al caso de grandes superficies con cobertura de baja teledensidad.

La disponibilidad de entorno radioeléctrico depende del entorno de servicio. A los efectos prácticos, la superficie total de un entorno de servicio dado sólo se cubre hasta cierto porcentaje X para cada entorno radioeléctrico, por ejemplo con picocélulas. Por tal motivo, en el Cuadro 9 se define el porcentaje de población atendida de cada entorno radioeléctrico para cada entorno de servicio. Los valores del Cuadro 9 son sólo ejemplos. El Cuadro 9 también identifica posibles combinaciones de entornos de servicio y entorno radioeléctrico. El porcentaje de población cubierta puede ser nulo en algunas combinaciones, lo que significa que el entorno radioeléctrico en cuestión no se ha implantado en el entorno de servicio dado. Los porcentajes de cobertura de la población se utilizan en el § 3.6 para distribuir el tráfico entre diversos entornos radioeléctricos.

CUADRO 9

Ejemplos de cobertura porcentual de la población de diversos entornos de implantación radioeléctrica para cada entorno de servicio

Entorno de servicio	Entornos radioeléctricos			
	Macro células	Micro células	Pico células	Células de punto caliente
ES1	100	0	0	80
ES2	100	0	20	80
ES3	100	80	20	10
ES4	100	0	0	80
ES5	100	20	20	20
ES6	100	0	10	50

3.4.4 GTAR

La metodología tiene en cuenta todo el mercado de comunicaciones terrenales suministradas mediante diversos medios de comunicación, en términos de servicios y redes, de conformidad con las Recomendaciones UIT-R M.1645, UIT-R M.1457 y UIT-R M.2012. Pueden identificarse varios GTAR. La presente metodología distribuye el tráfico total previsto, correspondiente a todo el mercado de comunicaciones terrenales, a los GTAR así identificados, es decir:

Grupo 1: Sistemas anteriores a las IMT, IMT-2000 y ampliaciones.

El grupo comprende también a los sistemas móviles celulares digitales, sistemas IMT-2000 y sus ampliaciones.

Grupo 2: Sistemas IMT-Avanzadas, según se exponen en la Recomendación UIT-R M.2012.

Grupo 3: LAN radioeléctricas existentes y sus ampliaciones.

Grupo 4: Sistemas de radiodifusión móvil digital y sus ampliaciones.

Los cuatro GTAR se consideran hasta el Paso 4 en el flujograma de la metodología de la Fig. 1, pero a partir del Paso 5 sólo se consideran los GTAR 1 y GTAR 2.

Caracteriza a cada GTAR una serie de parámetros que se presentan en los Cuadros 10a a 10d. Se supone que estos parámetros son idénticos para enlaces ascendentes y descendentes, por lo que sólo se requiere un valor único para cada parámetro.

Algunas categorías de servicio pueden beneficiarse, además, de aplicar modos de multidifusión móvil por parte del GTAR específico. Por multidifusión móvil debe entenderse una transmisión destinada a un grupo de receptores. Se requiere un enlace ascendente, por ejemplo para la gestión del grupo. Entre los ejemplos de servicios que pueden prestarse de manera eficaz a través de modos de transmisión en multidifusión móvil están los servicios del tipo de la televisión móvil y servicios de mensajería de baja velocidad de datos. Puesto que la eficacia espectral de ambos modos de transmisión puede presentar diferencias notables, se requieren valores separados para determinarla.

CUADRO 10a

Ejemplos de parámetros radioeléctricos requeridos para el GTAR 1

Atributo	GTAR 1				
	Valores				
	Unidad	Macro células	Micro células	Pico células	Células de punto caliente
Velocidad de datos de la aplicación	Mbit/s	1	1	2,5	–
Clases de movilidad soportadas		Estacionaria/ peatonal, baja, alta	Estacionaria/ peatonal, baja	Estacionaria/ peatonal	–
Banda de guarda entre operadores	MHz	0	0	0	–
Implantación mínima por operador por entorno radioléctrico	MHz	20	20	20	–
Número de instalaciones de red que se solapan	N.º	5	5	5	–
Granularidad de la implantación por operador por entorno radioléctrico	MHz	20	20	20	–
Posibilidad de utilización espectral flexible (FSU)	Booleano	No	No	No	–
Margen de FSU	Multiplificador	1	1	1	
Frecuencia típica de funcionamiento	MHz	< 2 700	< 2 700	< 2 700	–
Soporte de multidifusión	Booleano	Sí	Sí	Sí	–

El presente ejemplo no se aplica a las situaciones de grandes superficies con cobertura de baja teledensidad.

CUADRO 10b

Ejemplos de parámetros radioeléctricos requeridos para el GTAR 2

Atributo	GTAR 2				
	Valores				
	Unidad	Macro células	Micro células	Pico células	Células de punto caliente
Velocidad de datos de la aplicación	Mbit/s	50	100	1 000	1 000
Clases de movilidad soportadas		Estacionaria/ peatonal, baja, alta	Estacionaria/ peatonal, baja	Estacionaria/ peatonal	Estacionaria/ peatonal
Banda de guarda entre operadores	MHz	0	0	0	0
Implantación mínima por operador por entorno radioeléctrico	MHz	50-100	50-100	100	100
Granularidad de la implantación por operador por entorno radioeléctrico	MHz	20	20	20	20
Número de instalaciones de red que se solapan	N.º	1-4	1-4	1-4	1-4
FSU	Booleano	Sí	Sí	Sí	Sí
Margen de FSU	Multiplificador	1	1	1	1
Eficiencia espectral de la zona	bit/s/Hz/ célula	2-4	2-5	3-6	5-10
Eficiencia espectral de la zona para multidifusión	bit/s/Hz/ célula	1-1,5	1-2,5	1,5-3	2,5-5
Frecuencia típica de funcionamiento	MHz	< 6 000	< 6 000	< 6 000	< 6 000
Soporte de multidifusión	Booleano	Sí	Sí	Sí	Sí

CUADRO 10c

Parámetros radioeléctricos requeridos para el GTAR 3

Atributo	GTAR 3				
	Valores				
	Unidad	Macro células	Micro células	Pico células	Células de punto caliente
Velocidad de datos de la aplicación	Mbit/s	–	–	50	100
Clases de movilidad soportadas		–	–	Estacionaria/ peatonal	Estacionaria/ peatonal
Soporte de multidifusión (sí = 1, no = 0)		Sí			

CUADRO 10d

Parámetros radioeléctricos requeridos para el GTAR 4

Atributo	GTAR 4	
	Unidad	Macro células
Velocidad de datos de la aplicación	Mbit/s	2
Clases de movilidad soportadas		Todas (estacionaria/peatonal, baja y alta)

NOTA 1 – Sólo se consideran macro células a los efectos del GTAR 4.

En el Cuadro 11 se presentan valores de eficacia espectral. La metodología considera los valores de eficacia espectral de la zona como parámetros iniciales para el cálculo. En el modo de transmisión en multidifusión, el cuadro de eficacia espectral de la zona presenta otros valores. El cálculo de la eficacia espectral de la zona se entenderá y utilizará a partir de los datos medios de caudal alcanzado por todos los usuarios, distribuido homogéneamente en la zona del entorno de implantación radioeléctrica, por una capa IP para servicios de conmutación de paquetes y una capa de aplicación para circuitos de servicios conmutados, por redes de radiocomunicación plenamente cargadas. La eficacia espectral y las velocidades máximas de datos alcanzables en el borde de la célula deberían corresponder a la frecuencia típica de funcionamiento. En los valores de eficacia espectral se tiene en cuenta la posibilidad de retransmisiones de los servicios con conmutación de paquetes.

CUADRO 11

Matriz de eficacia espectral de zona para un GTAR

Teledensidad	GTAR N.º <i>rat</i>			
	Entornos radioeléctricos			
	Macro células	Micro células	Pico células	Células de punto caliente
Densa urbana	$\eta_{1, rat, 1}$ (bit/s/Hz/célula)			
Suburbana				
Rural				

3.4.5 Relación entre entornos de servicio, GTAR y entornos radioeléctricos

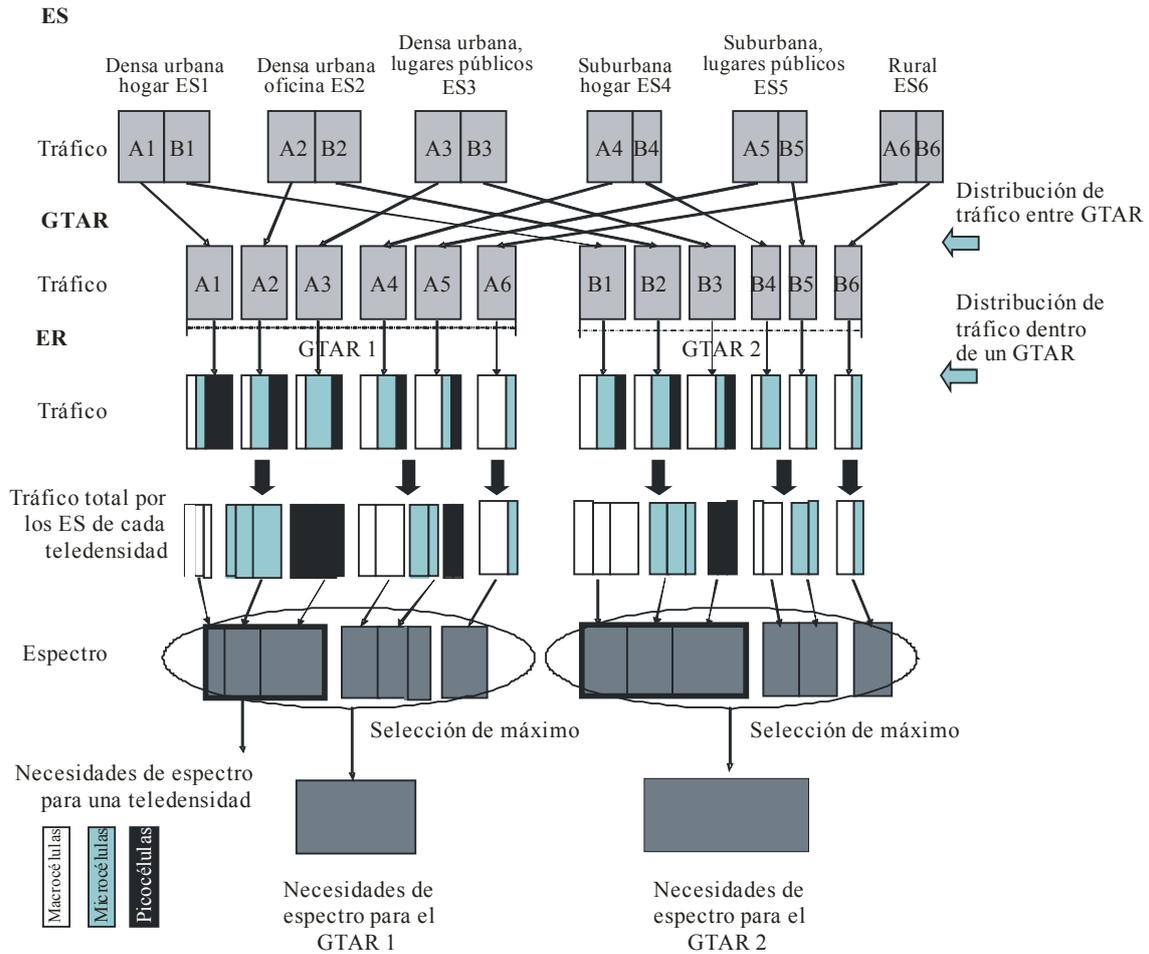
Los entornos de servicio y los entornos radioeléctricos han de considerarse separadamente en el cálculo del espectro, puesto que las demandas de tráfico se prevén únicamente en relación con los entornos de servicio, mientras que las necesidades de espectro se calculan para diversos GTAR y sus posibles entornos radioeléctricos. Se calculan las necesidades de espectro para cada teledensidad pero deben elegirse necesidades finales de espectro en función de los valores máximos de las necesidades de espectro de todas las teledensidades. Por consiguiente, debe primero sumarse el tráfico de los distintos entornos de servicio y sus correspondientes teledensidades.

La Fig. 2 presenta un ejemplo de distribución del tráfico entre seis entornos de servicio, dos GTAR y tres entornos radioeléctricos. Las demandas de tráfico de cada entorno de servicio pueden distribuirse a los GTAR. Por ejemplo, en la Fig. 2, el tráfico del entorno de servicio «densa urbana hogar» posee dos componentes es decir, las cantidades de tráfico A1 para el GTAR 1 y B1 para el GTAR 2. Los entornos de servicio «densa urbana oficina», «densa urbana lugares públicos», «suburbana hogar/lugares públicos» y «rural» también presentan cantidades de tráfico correspondientes a cada GTAR, que se desprenden en la Fig. 2.

Puesto que cada GTAR soporta uno o más entornos radioeléctricos, la cantidad de demanda de tráfico para cada uno en cada entorno de servicio puede distribuirse a los correspondientes entornos radioeléctricos soportados, como puede verse en el tercer nivel de la Fig. 2. El tráfico distribuido correspondiente a los entornos del servicio de la misma teledensidad se combina en el cuarto nivel de la Fig. 2. Cada GTAR responde a situaciones propias de implantación en relación con sus entornos radioeléctricos que lo componen, así como en relación con la eficacia espectral propia. Estas situaciones de implantación, por ejemplo el tamaño de las células, también repercuten en la eficacia del espectro. Teniendo esto en cuenta, pueden calcularse las necesidades de espectro a partir de la demandas de tráfico y coeficientes de eficacia espectral, para luego calcular separadamente las necesidades de espectro sobre la base de cada instancia combinada de teledensidad, GTAR y entorno radioeléctrico. Los rectángulos del quinto nivel de la Fig. 2 representan las necesidades espectrales de los GTAR para diferentes teledensidades. Las necesidades de espectro de todo GTAR corresponderán al máximo de necesidades de espectro de todas las teledensidades de dicho GTAR.

FIGURA 2

Distribución del tráfico entre ES, GTAR y ER



1768-03

3.5 Análisis de los datos de mercado recopilados

3.5.1 Recopilación de datos de mercado

Los datos de mercado se obtuvieron de las respuestas a los cuestionarios del documento sobre visión del servicio (Paso 2 de la Fig. 1).

Los cuestionarios contenían los siguientes aspectos, destinados a analizar las futuras tendencias de mercado y de aplicaciones:

- análisis de los servicios y el mercado de los servicios móviles existentes;
- parámetros esenciales de mercado;
- proyecciones de servicios y mercado para IMT, con inclusión de:
 - cuestiones de servicio;
 - cuestiones de mercado;
 - previsión preliminar del tráfico, y
 - información conexas;
- proyecciones de servicios y mercado para otros sistemas de radiocomunicaciones;
- los motores del futuro mercado; y
- toda otra visión de los servicios futuros.

Las respuestas a los cuestionarios se resumen y analizan en el Informe UIT-R M.2072, en particular los valores de entradas utilizados en la metodología que describe el Anexo 8 de dicho Informe. Los datos de mercado se suministran con respecto a tres momentos, los años 2010, 2015 y 2020.

Los datos de mercado más recientes se pueden encontrar en el Informe UIT-R M.2243.

3.5.2 Análisis de los datos

Terminología del análisis de datos de mercado

Aplicación: Una aplicación suficientemente general y esencial como para considerar todos sus servicios abarcados en la recopilación de manera concisa y apropiada.

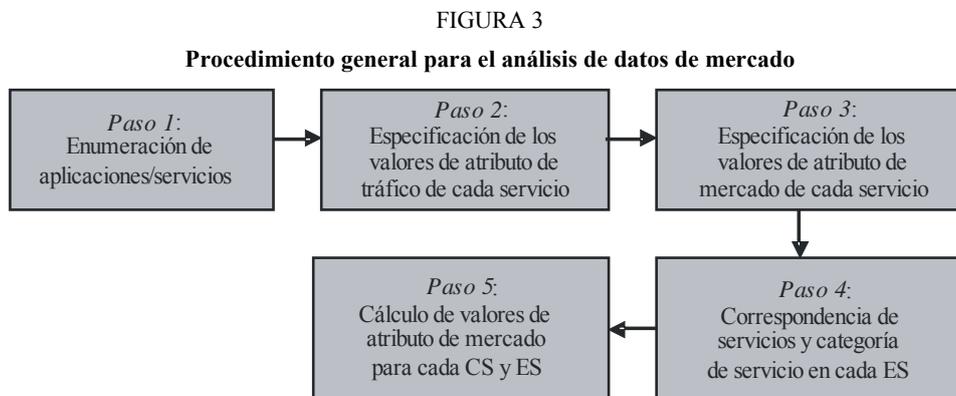
Servicio: El servicio es el elemento básico que compone una aplicación. Los servicios de una aplicación cumplen con la hipótesis de que funcionan en forma independiente. Por ejemplo, la utilización del servicio de vídeo por demanda (VoD) no depende de la utilización de un servicio audio por demanda (AoD). La segunda hipótesis es que todos los servicios correspondientes a la misma categoría de servicio poseen propiedades idénticas e independientes en cuanto a los atributos de mercado.

Parámetros de atributo de mercado: Vinculado al punto de vista del usuario. Estos valores se obtienen de los datos de mercado.

Parámetros de atributo de tráfico: Vinculado a las características de tráfico del servicio. Estos valores se obtienen analizando las tendencias técnicas.

3.5.2.1 Procedimiento general

La Fig. 3 describe el procedimiento general utilizado para analizar los datos de mercado.



1768-04

3.5.2.2 Enumeración de aplicaciones/servicios

Se indican todas las aplicaciones/servicios previsibles en el futuro. Como la lista de aplicaciones y servicios es uno de los importantes factores de cálculo del espectro, deberían elegirse los servicios, de manera que no se superpongan, de una aplicación suficientemente general y esencial para definir todos los servicios recopilados de manera concisa y apropiada.

En esta etapa, deben determinarse las listas de aplicaciones y servicios, que se incluirán en las columnas primera y segunda del Cuadro 12. La lista de aplicaciones así obtenida ha de subdividirse según las categorías de aplicaciones/servicios que figuran en el Cuadro 12, en función de sus atributos. Estas categorías deberían abarcar todas las categorías de aplicaciones previsibles, para que la estimación sea fiable.

CUADRO 12

Ejemplos de categorías de aplicación/servicio y sus respectivos atributos de tráfico

Aplicaciones	Servicios	Atributos de tráfico		
		Velocidad binaria media del servicio	Duración media de sesión	
Aplicaciones existentes	Voz (multimedios y datos de velocidad baja/conversacional)	64 kbit/s		
	Videotelefonía (multimedios de media velocidad/conversacional)	384 kbit/s		
	Paquetes	IM, Correo electrónico (datos de muy baja velocidad/segundo plano)	1 kbit/s	
		Correo en vídeo (multimedios de media velocidad/segundo plano)	512 kbit/s	
		Radiodifusión móvil (multimedios de alta velocidad/flujo continuo)	5 Mbit/s	
		Acceso a Internet (multimedios de alta velocidad)	10 Mbit/s	
Sistemas de supervisión urbana	Voz (multimedios y datos de baja velocidad/conversacional)	64 kbit/s		
	Comunicación vídeo (multimedios de media velocidad/conversacional)	384 kbit/s		
	Transmisión de datos de media velocidad para la supervisión de la información urbana (multimedios de media velocidad/interactivo)	384 kbit/s		
	Transmisión de datos de baja velocidad para reservar restaurantes, etc. (datos de muy baja velocidad/interactivo)	1 kbit/s		
	Transferencia de ficheros (multimedios de súper alta velocidad/segundo plano)	50 Mbit/s		

3.5.2.3 Especificación de los valores de atributo de tráfico de cada servicio

A partir de las listas de aplicaciones y servicios elaboradas en el Paso 1 de la Fig. 3, se especifican, para cada servicio en el Paso 2, los valores de los parámetros de atributos de tráfico, tales como velocidad binaria media de servicio y duración media de sesión.

Al examinar los servicios enunciados en el Paso 1, se extraen los atributos de tráfico indicados en el Cuadro 12. Este Cuadro proporciona valores típicos para:

- velocidad binaria media del servicio; y
- duración media de sesión.

Estos valores se utilizan para descomponer los datos de aplicaciones obtenidos del mercado, si no se han descompuesto ya en los datos de mercado recopilados.

3.5.2.4 Especificación de los valores de atributo de mercado de cada servicio

Las características variables en función del tiempo y de la región del tráfico por diferentes GTAR ofrecen una oportunidad para aumentar la eficacia de la utilización del espectro mediante la coordinación de redes y el programa de utilización flexible del espectro (FSU). La idea básica de esta concepción consiste en abandonar el criterio de atribuir a cada GTAR cantidades únicas y de alcance geográfico similar del espectro, permitiendo entre los GTAR el intercambio de espectro no utilizado en ese momento. En un sistema FSU ideal, sólo se atribuiría a la RAN la cantidad de espectro requerida para satisfacer la demanda de tráfico. Muchas técnicas de acceso radioeléctrico presentan estas características variables en el tiempo para responder al comportamiento variable de los usuarios en el curso de la jornada.

A fin de calcular la necesidad dinámica de espectro de una GTAR, se requieren valores de atributo de mercado para un intervalo de tiempo dado t . El ahorro de espectro que puede obtenerse aplicando el método FSU aumentará proporcionalmente a la mayor definición temporal de los valores de atributo de mercado suministrados.

A fin de analizar los datos de mercado, deben especificarse los valores de densidad de usuarios y de velocidad de llegada de sesión por usuario para cada servicio en cada entorno de servicio e intervalo de tiempo. Además, la relación de movilidad definida en el § 3.4.1.3 debe figurar en la distribución del tráfico. El Cuadro 13 presenta un ejemplo de la respuesta esperada al cuestionario sobre mercado y servicios.

3.5.2.5 Correspondencia de servicios y cuadro de categorías de servicio por entorno de servicio

Con arreglo al Cuadro 13, cada servicio puede hacerse corresponder al cuadro de tipos de servicio y clases de tráfico, según ilustra el Cuadro 1. Todos los servicios enumerados en el Cuadro 13 deberían corresponder al Cuadro 1. Este cuadro se elaborará para cada entorno de servicio, de modo que puedan establecerse seis cuadros diferentes, para todos los entornos de servicio.

3.5.2.6 Cálculo de los valores de atributo de mercado por categoría de servicio, entorno de servicio e intervalo de tiempo

El Cuadro 13 presenta los valores de atributo de mercado de cada servicio. En esta etapa, se calculan los valores de atributo de mercado para cada categoría de servicio, entorno de servicio e intervalo de tiempo. Los resultados aparecen en el Cuadro 14. Se suministran valores de atributo de mercado distintos, ya sea para enlaces ascendentes o descendentes.

Los valores requeridos para el entorno de servicio m , intervalo de tiempo t , y categoría de servicio n se deducen de los valores de parámetros de cada servicio como sigue:

CUADRO 13

Respuesta esperada al Cuestionario sobre mercado y servicios

Aplicaciones	Servicios s: índice	SC n	SE m	Atributos de mercado							
				Densidad de usuarios $U_{m,t,s}$ (usuarios/km ²)	Velocidad de llegada de sesión por usuario $Q_{m,t,s}$ (sesión/(s*usuario))	Velocidad binaria media de servicio r_s (bit/s)	Duración media de sesión $\mu_{m,t,s}$ (s/sesión)	Relación de movilidad (%) $MR_{m,s}$			
Estacionaria	Baja	Alta	Súper alta								
Sistemas de supervisión urbana	Supervisión de la información urbana s = 1	18	1		∩	∩	∩				
			2		∩	∩	∩				
			3								
					∩	∩	∩				
	Reservas s = 2										

La *densidad de usuarios* (usuarios/km²) de una categoría de servicio dada es la suma de las densidades de usuarios de cada servicio correspondiente a la categoría de servicio.

La expresión matemática es la siguiente:

$$U_{m,t,n} = \sum_{s \in n} U_{m,t,s} \tag{1}$$

donde $U_{m,t,n}$ y $U_{m,t,s}$ representan, respectivamente, la densidad de usuarios de la categoría de servicio n y la densidad de usuarios del servicio s dentro de la categoría n .

Velocidad de llegada de sesión por usuario (sesión/(s · usuario)) de una categoría de servicio dada, media ponderada de la velocidad de llegada de sesión por usuario de cada servicio correspondiente a dicha categoría de servicio. La ponderación de cada servicio está representada por la densidad de usuarios.

La expresión matemática es la siguiente:

$$Q_{m,t,n} = \frac{\sum_{s \in n} U_{m,t,s} Q_{m,t,s}}{U_{m,t,n}} \tag{2}$$

donde $Q_{m,t,n}$ y $Q_{m,t,s}$ representan la velocidad de llegada de sesión por usuario de servicios de la categoría de servicio n y la velocidad de llegada de sesión por usuario del servicio s dentro de la categoría de servicios n , respectivamente.

Duración media de sesión (s/sesión) de una categoría de servicio dada, media ponderada de la duración media de sesión de cada servicio correspondiente a dicha categoría de servicio. La ponderación está representada por la velocidad de llegada de sesión por zona. Distinguimos la unidad de tiempo «segundo» para la duración de la sesión y la unidad de tiempo «s» para definir un simple intervalo de tiempo.

La expresión matemática es la siguiente:

$$\mu_{m,t,n} = \sum_{s \in n} w_{m,t,s} \mu_{m,t,s} \quad (3)$$

donde:

$$w_{m,t,s} = \frac{U_{m,t,s} Q_{m,t,s}}{U_{m,t,n} Q_{m,t,n}}$$

en que $\mu_{m,t,n}$ y $\mu_{m,t,s}$ representan la duración media de sesión de la categoría de servicios n y la duración media de sesión del servicio s dentro de la categoría n , respectivamente.

Velocidad binaria media de servicio (bit/s) de una categoría de servicios dada, media ponderada de las velocidades binarias medias de servicio de cada servicio correspondiente a dicha categoría de servicios. La ponderación está representada por el volumen de tráfico (suma de las duraciones medias de todas las sesiones que llegan, durante una unidad de tiempo) por zona.

La expresión matemática es la siguiente:

$$r_{m,t,n} = \sum_{s \in n} \bar{w}_{m,t,s} r_{m,t,s} \quad (4)$$

donde:

$$\bar{w}_{m,t,s} = \frac{U_{m,t,s} Q_{m,t,s} \mu_{m,t,s}}{U_{m,t,n} Q_{m,t,n} \mu_{m,t,n}}$$

en que $r_{m,t,n}$ y $r_{m,t,s}$ representan la velocidad de datos de servicio de la categoría de servicio n y la velocidad de datos de servicio s dentro de la categoría de servicios n , respectivamente.

Relación de movilidad de una categoría de servicio dada, media ponderada de cada relación de movilidad por usuario de una categoría de servicio de cada servicio correspondiente a esta categoría de servicios. Se entiende que la relación de movilidad es independiente del tiempo. La ponderación de cada servicio se calcula como la relación del tráfico ofrecido de un servicio respecto del tráfico total ofrecido, dentro de la categoría de servicio en el entorno de servicio dado.

La expresión matemática es la siguiente:

$$MR_market_{m,t,n} = \sum_{s \in n} \bar{w}_{m,t,s} MR_market_{m,s} \quad (5)$$

donde $MR_market_{m,t,n}$ y $MR_market_{m,s}$ representan la relación de movilidad de la categoría de servicio n y la relación de movilidad del servicio s dentro de la categoría de servicio n , respectivamente. Obsérvese que esta ecuación puede aplicarse a todos los casos de movilidad.

Las relaciones de movilidad MR_{market} obtenidas del estudio de mercado según esta fórmula para movilidades estacionaria (sm), baja (lm), alta (hm) y súper alta (shm) deben corresponder con las relaciones de movilidad de la metodología, MR , para las movilidades estacionaria/peatonal (sm), baja (lm) y alta (hm), que se utilizan en la distribución del tráfico con arreglo al § 3.6. La correspondencia se efectúa de acuerdo con el § 3.4.1.3, obteniéndose J_m factores, que figuran en el Cuadro 4. La relación de movilidad para movilidad estacionaria se deduce de:

$$MR_{sm_{m,t,n}} = MR_{market_sm_{m,t,n}} + MR_{market_lm_{m,t,n}} \tag{6}$$

La relación de movilidad para movilidad baja es la siguiente:

$$MR_{lm_{m,t,n}} = J_m \cdot MR_{market_hm_{m,t,n}} \tag{7}$$

La relación de movilidad para movilidad alta es la siguiente:

$$MR_{hm_{m,t,n}} = (1 - J_m) \cdot MR_{market_hm_{m,t,n}} + MR_{market_shm_{m,t,n}} \tag{8}$$

CUADRO 14

Datos de mercado para categorías de servicio de un entorno de servicio

Categoría de servicio	Entorno de servicio					
	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6
CS1	$U_{1,t,1}$ $Q_{1,t,1}$ $\mu_{1,t,1}$ $r_{1,t,1}$ $MR_{1,t,1}$	$U_{2,t,1}$ $Q_{2,t,1}$ $\mu_{2,t,1}$ $r_{2,t,1}$ $MR_{2,t,1}$	...	...	...	$U_{6,t,1}$ $Q_{6,t,1}$ $\mu_{6,t,1}$ $r_{6,t,1}$ $MR_{6,t,1}$
CS2	$U_{1,t,2}$ $Q_{1,t,2}$ $\mu_{1,t,2}$ $R_{1,t,2}$ $MR_{1,t,2}$	...	...	...	...	...
CS3	...	...	...	...	...	...
...

3.6 Distribución del tráfico por técnicas de acceso radioeléctrico y entornos radioeléctricos para cada GTAR

El tráfico obtenido para cada entorno de servicio, intervalo de tiempo y categoría de servicio ha de distribuirse entre los posibles GTAR y entornos radioeléctricos. Esta etapa corresponde al Paso 4 del flujograma genérico de la metodología representada en la Fig. 1.

Cada entorno de servicio está soportado por uno o más GTAR. Por lo tanto, el tráfico distribuido entre entornos de servicio puede volver a distribuirse según los GTAR.

Para la distribución del tráfico se utilizan los siguientes datos:

- Los valores de tráfico por categoría y entorno de servicio, obtenidos de los resultados del Paso 3 de la Fig. 1, como puede verse en el Cuadro 14.
- La matriz de definición de entorno de servicio conforme al Paso 1 de la Fig. 1, con inclusión de los entornos radioeléctricos viables y porcentajes de cobertura de población de cada entorno de servicio, según el Cuadro 9.
- Las matrices de definición de GTAR conforme al Paso 1 de la Fig. 1, según los Cuadros 10a a 10d.
- Las relaciones de distribución entre GTAR disponibles, según el Cuadro 16.

Como resultado, el proceso genera valores de tráfico ofrecido de cada categoría de servicio n en cada entorno de servicio m e intervalo de tiempo t , dividido por los GTAR y entornos radioeléctricos. Si la categoría de servicio se atiende mediante reservas basadas en un plan cronológico (conmutación de circuitos), el resultado será la velocidad media de llegada de sesión y la velocidad binaria media de servicio de la categoría de servicio n en el entorno de servicio m y el intervalo de tiempo t , por célula o sector de GTAR rat y entorno radioeléctrico p . Estos valores se calculan en el § 3.6.3.1. Si la categoría de servicio se atiende siguiendo un plan cronológico basado en paquetes, el resultado será la velocidad binaria total de la categoría de servicio n en el entorno de servicio m y el intervalo de tiempo t , por célula o sector de GTAR rat . El cálculo de este valor figura en el § 3.6.3.2.

3.6.1 Relaciones de distribución

Las velocidades de llegada de sesión se distribuyen entre los GTAR y entornos radioeléctricos mediante las relaciones de distribución $\xi_{m,t,n,rat,p}$. Las relaciones de distribución se deducen separadamente para las distintas categorías de servicio en los diferentes entornos de servicio e intervalos de tiempo, ya sea para el tráfico ascendente o el tráfico descendente, debido a las diferencias que presentan los valores de tráfico respectivos.

Para obtener los factores $\xi_{m,t,n,rat,p}$, se aplican las siguientes reglas, que respetan los datos definidos en la sección anterior:

Las relaciones de distribución se determinan a través de tres fases.

La Fase 1 determina qué combinaciones de GTAR y entornos radioeléctricos no pueden soportar una categoría de servicio dada en un entorno de servicio dado. Las relaciones de distribución correspondientes se ponen en 0, mientras que las posibles combinaciones se ponen en 1. La Fase 1 establece relaciones de distribución nulas en los siguientes casos:

- GTAR 4 para categorías de servicio de distribución única;
- entornos radioeléctricos no existentes en el entorno de servicio considerado, a partir de las definiciones de entornos de servicio del Cuadro 9;
- entornos radioeléctricos no soportados por el GTAR en cuestión, a partir de las definiciones de GTAR de los Cuadros 10a a 10d;
- toda combinación de GTAR y entorno radioeléctrico para la cual la aplicación de velocidad de datos de las definiciones de GTAR de los Cuadros 10a a 10d es inferior a la velocidad de datos requerida de una categoría de servicio en particular, lo que se obtiene de las definiciones de categoría de servicio del Cuadro 14;
- entornos radioeléctricos macrocelulares para los GTAR que no soportan toda la gama de velocidades asociadas a la clase de alta movilidad según los Cuadros 10a a 10d.

El resultado de la Fase 1 es un cuadro de posibilidades combinadas de valor cero o uno. El Cuadro 15 presenta un ejemplo limitado a tres entornos de servicio y seis categorías de servicio para un GTAR y un solo intervalo de tiempo. Un cuadro total contendría los seis entornos de servicio y 20 categorías de servicio.

CUADRO 15

**Ejemplo de posibles combinaciones de CS, ES y ER para un GTAR
y un intervalo de tiempo, al término de la Fase 1
de la distribución del tráfico**

Categoría de servicio	ES1				ES2				ES3			
	Macro	Micro	Pico	Punto caliente	Macro	Micro	Pico	Punto caliente	Macro	Micro	Pico	Punto caliente
CS ₁	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
CS ₂	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
CS ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS ₅	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
CS ₆	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En la *Fase 2* se distribuye el tráfico entre los GTAR. La relación de distribución entre GTAR depende de los GTAR disponibles en cada entorno radioeléctrico y entorno de servicio. La Fase 1 define, en el Cuadro 15, los GTAR disponibles en el entorno de servicio dado para cada entorno radioeléctrico y cada categoría de servicio. La distribución entre los GTAR disponibles se lleva a cabo mediante los valores de distribución que figuran en el Cuadro 16, que representa los valores de parámetros aplicables a la metodología. Para cada combinación de categorías de servicio, entornos radioeléctricos, entornos de servicio e intervalos de tiempo, las relaciones de distribución de GTAR aparecen en el Cuadro 16, en la hilera correspondiente a la disponibilidad de GTAR para la combinación requerida del Cuadro 15. Los valores que aparecen en el Cuadro 16 son sólo ejemplos.

CUADRO 16

Ejemplo de relaciones de distribución entre GTAR disponibles

GTAR disponibles	Relación de distribución (%)			
	GTAR 1	GTAR 2	GTAR 3	GTAR 4
1	100	–	–	–
2	–	100	–	–
3	–	–	100	–
4	–	–	–	100
1, 2	20	80	–	–
1, 3	20	–	80	–
1, 4	10	–	–	90
2, 3	–	20	80	–
2, 4	–	10	–	90
3, 4	–	–	10	90
1, 2, 3	20	20	60	–
1, 2, 4	10	10	–	80
1, 3, 4	10	–	10	80
2, 3, 4	–	10	10	80
1, 2, 3, 4	10	10	10	70

En la *Fase 3* se distribuye el tráfico entre los entornos radioeléctricos en función de las relaciones de movilidad y porcentajes de cobertura.

La metodología define las clases de movilidad estacionaria/peatonal, baja y alta. La correspondencia entre clases de movilidad y entornos radioeléctricos es la siguiente:

- Alta movilidad: macrocélulas únicamente
- Baja movilidad: microcélulas y macrocélulas
- Estacionaria/peatonal: todos los entornos radioeléctricos.

Se supone que esta correspondencia entre clases de movilidad y entornos radioeléctricos es igual para todos los GTAR. En función de ello se escogen las respectivas gamas de velocidad para las clases de movilidad y el parámetro de velocidad máxima soportada de cada entorno radioeléctrico.

La distribución del tráfico aplica el principio de utilizar el entorno radioeléctrico de menor soporte de la movilidad que satisfaga las necesidades. Ello se debe a que las células de punto caliente y las picocélulas ofrecen por lo general capacidades mayores y son más eficaces desde el punto de vista espectral que las microcélulas, lo cual también vale para la relación entre microcélulas y macrocélulas. Aplicando únicamente este principio, de hecho todo el tráfico estacionario/peatonal pertenecería a las células de punto caliente y picocélulas, toda la baja movilidad a las microcélulas y toda la alta movilidad a las macrocélulas (toda vez que el entorno radioeléctrico respectivo esté disponible, ya que de otro modo el tráfico pasará al entorno radioeléctrico de mayor soporte de movilidad). Sin embargo, de hecho la superficie total de un entorno de servicio dado sólo está cubierta hasta cierto porcentaje *X* por cada entorno radioeléctrico, por ejemplo picocélulas.

El Cuadro 9 define el porcentaje de cobertura de población de cada entorno radioeléctrico para cada entorno de servicio. Los porcentajes de cobertura de población son independientes del GTAR. Sin embargo, de no soportar un GTAR un entorno radioeléctrico dado, la velocidad de datos límite de la

célula correspondiente de dicha combinación de GTAR/entorno radioeléctrico será nula, para que la Fase 1 de la distribución del tráfico imponga el correspondiente coeficiente de distribución cero.

El porcentaje de cobertura de la población establece un límite al fraccionamiento del tráfico en términos de densidad de tráfico distribuible a dicho entorno radioeléctrico. Utilizando la información sobre porcentaje de cobertura de población $X_{punto\ caliente}$, X_{pico} , X_{micro} y X_{macro} proporcionada por los entornos radioeléctricos de células de punto caliente, picocélulas, microcélulas y macrocélulas, el algoritmo distribuye las siguientes proporciones de tráfico entre los entornos de punto caliente, pico, micro y macro:

$$\xi_{pico\&punto\ caliente} = \min(X_{pico} + X_{punto\ caliente}, MR_{sm}) \quad (9)$$

$$\xi_{micro} = \min(X_{micro}, (MR_{sm} + MR_{lm}) - \xi_{pico\&punto\ caliente}) \quad (10)$$

$$\xi_{macro} = 1 - \xi_{pico\&punto\ caliente} - \xi_{micro} \quad (11)$$

MR_{sm} y MR_{lm} representan los coeficientes de tráfico ofrecido, respectivamente en las clases de movilidad estacionaria y baja. La relación matemática supone que:

$$MR_{sm} + MR_{lm} + MR_{hm} = 1 \quad (12)$$

Entre las células de punto caliente y picocélulas, el tráfico se distribuye proporcionalmente a la relación de coeficiente de cobertura de población de células de punto caliente y picocélulas:

$$\xi_{punto\ caliente} = \xi_{pico\&punto\ caliente} \cdot X_{punto\ caliente} / (X_{pico} + X_{punto\ caliente}) \quad (13)$$

$$\xi_{pico} = \xi_{pico\&punto\ caliente} \cdot X_{pico} / (X_{pico} + X_{punto\ caliente}) \quad (14)$$

Las categorías de servicio que pueden suministrarse mediante multidifusión se tratan por separado. Siempre se distribuyen a los GTAR que soportan el modo de transmisión de multidifusión y la categoría del servicio dada en el entorno radioeléctrico de células de mayor tamaño disponibles, es decir, que los coeficientes de distribución de las células de mayor tamaño de estos GTAR se establecen con valor uno. La situación corresponde al caso de prestación simultánea del servicio de multidifusión por todos estos GTAR. El coeficiente de cobertura de la población no se considera en el caso de multidifusión, ya que el tráfico de multidifusión no tiene en cuenta la densidad de usuarios. Obsérvese que, como resultado de esta regla, una categoría de servicio puede distribuirse a múltiples GTAR y la suma resultante de coeficientes de distribución por los GTAR puede ser mayor que uno.

NOTA 1 – La metodología no tiene en cuenta la posibilidad de entrega de datos de multidifusión idénticos o diferentes a diversos entornos de servicio de la misma célula (en el caso de datos de multidifusión iguales, la necesidad de espectro es inferior que en el caso de datos de multidifusión diferentes).

3.6.2 Distribución de velocidades de llegada de sesión

La velocidad de llegada de sesión por zona (sesiones/(s · km²)) de una categoría de servicio n y un entorno de servicio m distribuido a GTAR rat en entorno radioeléctrico p en el intervalo de tiempo t , es decir $P_{m,t,n,rat,p}$, se calcula a partir de la relación de distribución $\xi_{m,t,n,rat,p}$, la densidad de usuario $U_{m,t,n}$ y la velocidad de llegada de sesión por usuario $Q_{m,t,n}$ (que se definen en el § 3.5.2.6), según la siguiente fórmula:

$$P_{m,t,n,rat,p} = \xi_{m,t,n,rat,p} \cdot U_{m,t,n} \cdot Q_{m,t,n} \quad (15)$$

La suma de los coeficientes de distribución por el GTAR de índice rat y el entorno radioeléctrico de índice p es igual a uno, es decir, $\sum_{rat} \sum_p \xi_{m,t,n,rat,p} = 1$. Por tanto $\sum_{rat} \sum_p P_{m,t,n,rat,p} = U_{m,t,n} \cdot Q_{m,t,n}$.

El tráfico de todos los usuarios en una célula debe sumarse. La velocidad de llegada de sesión/célula (sesiones/(s · célula)) se calcula del siguiente modo:

$$P'_{m,t,n,rat,p} = P_{m,t,n,rat,p} \cdot A_{d,p} \quad (16)$$

donde $A_{d,p}$ es la superficie de la célula (km²) del GTAR rat en la teledensidad d y el ER p , de tal modo que d esté determinado unívocamente por m (Cuadro 6). $P'_{m,t,n,rat,p}$ representa la velocidad de llegada de sesión por célula de la categoría de servicio n en el GTAR rat en el entorno de servicio m y el entorno radioeléctrico p , durante el intervalo de tiempo t .

En el modo de transmisión de multidifusión móvil, se emplea una fórmula especial¹.

3.6.3 Cálculo del tráfico ofrecido

A fin de calcular las necesidades de espectro, es necesario determinar el tráfico ofrecido para cada categoría de servicio. En las clases conversacional y de flujo continuo (categorías de servicio 1 a 10), el servicio se presta mediante conmutación de circuitos, mientras que las clases de segundo plano e interactiva (categorías de servicio 11 a 20) requieren conmutación de paquetes. Por consiguiente, la oferta de tráfico se calcula en función de los valores de entrada requeridos, ya sea por el método de cálculo de conmutación de circuitos o de conmutación de paquetes. También es necesario sumar el tráfico por los entornos de servicio pertenecientes a la misma teledensidad, tal como ilustra el Cuadro 6.

3.6.3.1 Tráfico de circuitos conmutados

Para la conmutación de circuitos, la velocidad de llegada de sesión $P'_{m,t,n,rat,p}$ de distribución y la duración media de sesión $\mu_{m,t,n}$ se utilizan como parámetros de entrada para el cálculo de capacidad. En términos matemáticos, su producto es equivalente al tráfico ofrecido, medido en Erlangs.

Los valores totales del producto de la velocidad de llegada de sesión por célula y la duración media de sesión para las diversas teledensidades d se reúnen en la oferta de tráfico $\rho_{d,t,n,rat,p}$ (s/(s · célula)) que se obtiene de la ecuación:

$$\rho_{d,t,n,rat,p} = \sum_{m \in d} P'_{m,t,n,rat,p} \mu_{m,t,n} \quad (17)$$

Representa la suma de duraciones medias de todas las sesiones de la CS n que llega por tiempo unitario en una célula de teledensidad d , GTAR rat y entorno radioeléctrico p en el intervalo de tiempo t . La unidad de $\rho_{d,t,n,rat,p}$ está también representada por la relación (Erlang/célula).

¹ Se supone que las categorías de servicio de multidifusión se suministran a múltiples usuarios simultáneamente por un recurso radioeléctrico compartido. Por lo tanto, se supone que el efecto de la densidad de usuarios es insignificante. La distribución del tráfico a los GTAR que soportan multidifusión móvil y a los entornos radioeléctricos se lleva a cabo, por consiguiente, distribuyendo la velocidad de llegada de sesión $P'_{m,t,n,rat,p} = \xi_{m,n,rat,p} \cdot Q_{m,t,n}$.

Los valores totales de la velocidad binaria media de servicio $r_{d,t,n,rat,p}$ (bit/s) para la teledensidad d se obtienen como sigue:

$$r_{d,t,n,rat,p} = \frac{\sum_{m \in d} P'_{m,t,n,rat,p} \mu_{m,t,n} r_{m,t,n}}{\rho_{d,t,n,rat,p}} \quad (18)$$

3.6.3.2 Tráfico de paquetes conmutados

Para las categorías de servicio con conmutación de paquetes, el cálculo de la capacidad requiere expresar el tráfico ofrecido en bit/(s · célula). La oferta de tráfico se da como tráfico ofrecido total por los entornos de servicio pertenecientes a la misma teledensidad. $T_{d,t,n,rat,p}$ representa el tráfico ofrecido para la categoría de servicio n en el GTAR rat del entorno radioeléctrico p para la teledensidad d , en el intervalo de tiempo diferente t . Se obtiene a partir de:

$$T_{d,t,n,rat,p} = \sum_{m \in d} P'_{m,t,n,rat,p} \mu_{m,t,n} r_{m,t,n} \quad (19)$$

que representa la suma de la cantidad de bits incluida en todas las sesiones de SC n que llega por unidad de tiempo a una célula con teledensidad d , GTAR rat y entorno radioeléctrico p , en el intervalo de tiempo t .

4 Determinación de la capacidad requerida del sistema y de las necesidades de espectro

En el Paso 6 de la Fig. 1, la capacidad requerida del sistema llegará a atender el tráfico ofrecido básico, mientras que el cumplimiento de las necesidades de calidad de servicio para cada categoría de servicio n se define para cada GTAR rat y entorno radioeléctrico p en cada teledensidad d e intervalo de tiempo t . La capacidad requerida del sistema, expresada en bit/s, se determina separadamente para el tráfico de circuitos conmutados (procedimiento de reserva) y paquetes conmutados. El número de categorías de servicio con circuitos conmutados se establece como N_{cs} , mientras que el número de categorías de servicio basadas en paquetes se simboliza como N_{ps} , siendo $N = N_{cs} + N_{ps}$ la cantidad total de categorías de servicio.

Los resultados de estos cálculos proporcionan la capacidad requerida del sistema $C_{d,t,rat,p,cs}$ y $C_{d,t,rat,p,ps}$ [bit/(s · célula)], respectivamente, para el tráfico de circuitos conmutados y el tráfico de paquetes conmutados.

$C_{d,t,rat,p,cs}$ representa la capacidad del sistema requerida para satisfacer las necesidades de calidad de servicio de todas las QoS de circuitos conmutados (procedimiento de reserva) en la teledensidad d , el intervalo de tiempo t , el GTAR rat y el entorno radioeléctrico p , mientras que $C_{d,t,rat,p,ps}$ representa la capacidad del sistema requerida para satisfacer las necesidades de calidad de servicio de todas las categorías de servicio con paquetes conmutados en la teledensidad d , el intervalo de tiempo t , el GAT rat y el entorno radioeléctrico p .

4.1 Cálculo de la capacidad requerida del sistema para el tráfico de circuitos conmutados

La capacidad requerida del sistema para categorías de servicio con circuitos conmutados (procedimiento mediante reserva) está en función del número de canales de servicio necesarios para alcanzar una probabilidad de bloqueo dada, junto con la velocidad de datos del canal. La conocida teoría de Erlang viene al caso para calcular la capacidad que se necesita para obtener una probabilidad de bloqueo inferior o igual a un valor específico [Kleinrock, 1975]. Los parámetros de

entrada utilizados para determinar el número requerido de canales de servicio para sesiones con conmutación de circuitos son los siguientes:

- El tráfico ofrecido en Erlangs por célula o sector $\rho_{d,t,n,rat,p}$ (§ 3.6.3.1).
- La velocidad de datos de canal $r_{d,t,n,rat,p}$ para la categoría de servicio n (§ 3.6.3.1).
- La probabilidad máxima admisible de bloqueo π_n , cuyos valores aparecen en el Cuadro 5 (§ 3.4.1.3).

A continuación, se sustituyen $\rho_{d,t,n,rat,p}$ y $r_{d,t,n,rat,p}$ por ρ_n y r_n , respectivamente, a fin de facilitar la legibilidad.

Teniendo en cuenta la ganancia por concentración de enlaces, la fórmula Erlang-B puede ampliarse al caso multidimensional, que a su vez permite la ocupación simultánea de varios canales por cada célula, como se describe a continuación. Suponemos que las células de clases N_{cs} comparten el conjunto de v canales y que cada llamada de clase n requiere v_n canales simultáneamente ($1 \leq n \leq N_{cs}$). Si una llamada entrante de clase n encuentra menos canales disponibles que v_n , se bloquea y se pierde; sea $v \equiv (v_1, v_2, \dots, v_{N_{cs}})$. Las llamadas de clase n llegan a través de un proceso de Poisson de velocidad P_n , independiente de otras clases, y han distribuido exponencialmente los tiempos de retención en el promedio μ_n , de suerte que el tráfico ofrecido de clase n sea ρ_n . Todos los canales utilizados por una llamada se liberan al final del tiempo de retención.

Sea el estado del sistema $i \equiv (i_1, i_2, \dots, i_{N_{cs}})$, en que i_m representa la cantidad de llamadas de clase m que están utilizando los canales. En consecuencia, la función de masa de probabilidad de estado constante adquiere una sencilla *forma de producto*:

$$P(i) = G(v)^{-1} \prod_{m=1}^{N_{cs}} \frac{(\rho_m)^{i_m}}{i_m!} \quad (20)$$

siendo:

$$G(k) = \sum_{\{i: 0 \leq v \cdot i \leq k\}} \prod_{m=1}^{N_{cs}} \frac{(p_m)^{i_m}}{i_m!}, \quad 1 \leq k \leq v \quad (21)$$

en que $v \cdot i \equiv \sum_{m=1}^{N_{cs}} v_m i_m$ representa la cantidad de canales utilizados cuando el estado del sistema es i .

La probabilidad de bloqueo de llamadas de clase n surge de:

$$B_n(v) = \sum_{\{i: v \cdot i > v - v_n\}} P(i) = 1 - \frac{G(v - v_n)}{G(v)} \quad (22)$$

Puesto que la computación de tipo fuerza bruta $G(k)$ por la ecuación (21) presenta algunas dificultades de cómputo, se han elaborado algunos algoritmos eficaces. Está entre ellos el algoritmo recursivo unidimensional de Kaufman y Roberts [1981], que es sencillo y preferible desde el punto de vista del cómputo. Dicho algoritmo se ha modificado para responder al cálculo reiterado en el caso inverso de determinar la capacidad del sistema para satisfacer la necesidad del usuario en lo que se refiere a las probabilidades de bloqueo [Takagi y otros, 2005].

Concretamente, a partir de $G(0) = 1$, calculamos recursivamente $G(k)$, $k = 1, 2, \dots, \nu$, como sigue:

$$G(k) = \frac{1}{k} \left[\sum_{j=0}^{k-1} G(j) + \sum_{m=1}^{N_{cs}} \nu_m \rho_m G(k - \nu_m) \right] \quad (23)$$

para $G(k) = 0$ y $k < 0$. Este algoritmo produce las probabilidades de bloqueo para sistemas de hasta ν canales, todos ellos con un tiempo de cómputo $O(N_{cs}\nu)$ y necesidad de memoria $O(\nu)$.

El modelo y algoritmo mencionados se utilizan para calcular la probabilidad de bloqueo para cada categoría de servicio N_{cs} , dado el total de canales ν . Por el método inverso, el total de canales se calcula para satisfacer la condición de probabilidad de bloqueo de cada categoría, según los requisitos del usuario. La capacidad del sistema se obtiene multiplicando el total requerido de canales por la velocidad binaria por canal.

Para mayor comodidad, sea r (bit/s) la unidad de velocidad binaria de servicio por canal. Cuando la velocidad binaria de servicio para la categoría n es r_n , el parámetro ν_n que se utilizará en la fórmula anterior es:

$$\nu_n = \lceil r_n / r \rceil, \quad 1 \leq n \leq N_{cs} \quad (24)$$

en que $\lceil x \rceil$ representa el menor entero, mayor o igual a x (función tope). Esto significa que, en el cálculo del número de canales, se utiliza r como unidad de velocidad de datos para cada categoría de servicio.

Sea π_n la probabilidad de bloqueo de la categoría de servicio n que requiere el usuario. En consecuencia, el número requerido de canales por célula, κ , se deduce como el menor valor ν que satisfaga simultáneamente las condiciones siguientes:

$$B_n(\nu) < \pi_n, \quad 1 \leq n \leq N_{cs} \quad (25)$$

Por último, la capacidad requerida del sistema $C_{d,t,rat,p,cs}$ (bit/(s · célula)) para todas las categorías de circuitos conmutados corresponde a:

$$C_{d,t,rat,p,cs} = \kappa \times r \quad (26)$$

4.2 Cálculo de la capacidad requerida del sistema para tráfico de paquetes conmutados

La capacidad del sistema que se requiere para satisfacer la necesidad de retardo medio de cada categoría de servicio se determina mediante un modelo de cola de espera aplicable a tiempos de llegada independientes de paquetes y una distribución arbitraria de tamaños de paquete. En la teoría de la cola de espera, se trata de un modelo de cola de espera M/G/1 sin prioridades preferentes o sistema de cola de espera de cabeza de línea [Klienrock, 1976]. Una prioridad no preferente significa que, al arribo de una tarea de mayor prioridad que la tarea en curso, ésta no se interrumpe, sino que se ejecuta hasta el final, antes de dar inicio a la nueva tarea de mayor prioridad. Para cada categoría de servicio basado en paquetes se utiliza un nivel de prioridad, pero también es posible reunir diversas categorías de servicio en una prioridad. Para cada nivel de prioridad, los paquetes entrantes quedan en una cola de espera separada. Dentro de la cola de cada nivel de prioridad, se aplica el principio de atención por orden de llegada.

En nuestro caso se configura una técnica de acceso radioeléctrico sobre la base de un único canal de paquetes, independientemente del número de canales empleado paralelamente en una técnica real, ya que no hay ganancia de concentración de enlaces posible en la multiplexión de paquetes concentrados en una cola de espera para transmitir por uno o varios canales paralelos. No se tiene en cuenta la sobrecarga mínima resultante de la fragmentación y relleno de tráfico que produce la utilización de canales múltiples paralelos de media velocidad, en lugar de un solo canal de velocidad alta de la misma capacidad. La duración del servicio en el sistema de cola de espera se determina a partir del tamaño de los paquetes y la velocidad de transmisión de los datos.

La determinación de la capacidad requerida del sistema para tráfico de paquetes requiere la entrada de los siguientes parámetros:

- Para cada categoría de servicio, la oferta básica de tráfico por entorno de servicio y célula $T_{d,t,n,rat,p}$ (bit/(s · célula)) que se define en el § 3.6.3.2.
- El valor medio de s_n (bits/paquete) y la $s_n^{(2)}$ de segundo momento (bits²/paquetes) de la distribución de tamaños de paquetes IP de cada categoría de servicio n , según el Cuadro 5.
- El retardo medio requerido D_n de cada categoría de servicio, según el Cuadro 5.
- La clasificación de prioridad de todas las categorías de servicio n para $n = 1, 2, \dots, N_{ps}$. Se supone que la categoría de servicio $n = 1$ es la mayor prioridad, de modo que los paquetes IP de categoría de servicio $n = 1$ se atienden primero. La categoría de servicio $n = N_{ps}$ es de menor prioridad. El orden de prioridades de las categorías de servicio corresponde a los números de las categorías de servicio.

La velocidad de llegada del paquete IP resultante por célula λ_n (paquetes/(s · célula)) de la categoría de servicio n se obtiene dividiendo la oferta básica de tráfico por el tamaño medio de paquetes (Cuadro 5):

$$\lambda_{d,t,n,rat,p} = \frac{T_{d,t,n,rat,p}}{s_n} \quad (27)$$

Para facilitar la legibilidad, se omiten los índices d,t,rat y p , de modo que $\lambda_{d,t,n,rat,p}$ pasa a ser λ_n , hasta el final de esta sección.

La velocidad de llegada total para todas las categorías de servicio se expresa mediante:

$$\lambda_{\leq N_{ps}} = \sum_{n=1}^{N_{ps}} \lambda_n \quad (28)$$

La capacidad del sistema C_n necesaria para obtener el retorno medio requerido por la categoría de servicio n puede calcularse por el procedimiento descrito a continuación. El nivel de prioridad que requiere la mayor capacidad expresa la capacidad total requerida del sistema, puesto que en el caso de satisfacerse los requisitos de QoS de la categoría de servicio más exigente, los requisitos de las demás categorías de servicio quedarán satisfechos. Por consiguiente, la capacidad total requerida del sistema se expresa mediante:

$$C_{d,t,rat,p,ps} = \text{máx} (C_1, C_2, \dots, C_{N_{ps}}) \quad (29)$$

Una tarea atendida por el sistema de cola de espera se define como un paquete IP. Al utilizarse un sistema de prioridades no preferentes se estima que cada paquete IP queda totalmente atendido antes de cambiar la atribución del recurso radioeléctrico en servicio. Ésta es una hipótesis válida, ya que en muchos casos la interrupción del servicio de un paquete IP produce pérdida de la capacidad ya utilizada para dicho paquete.

El retardo medio por paquete IP, es decir, D_n , correspondiente a la suma del tiempo de espera medio y la duración de servicio media, para la categoría de servicio n en un sistema con capacidad C se define como sigue:

$$D_n(C) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ps}} \lambda_i s_i^{(2)}}{2 \left(C - \sum_{i=1}^n \lambda_i s_i \right) \left(C - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i \right)} + \frac{s_n}{C} \quad (30)$$

Esta expresión se ha deducido de la ecuación de Cobham para el tiempo de espera medio de una sola llegada M/G/1 de cola de espera de prioridades no preferentes [Cobham, 1954; Irnich y Walke, 2004].

La expresión se utiliza para determinar la capacidad del sistema C_n que se requiere para satisfacer la condición de calidad de servicio $D_n(C_n) = D_n$. Seguidamente, C_n se define como una solución de la ecuación de tercer grado:

$$a_n x^3 + b_n x^2 + c_n x + d_n = 0 \quad (31)$$

cuyos coeficientes a_n , b_n , c_n y d_n equivalen a:

$$\begin{aligned} a_n &= 2D_n \\ b_n &= 2 \left(D_n \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i \right) + s_n \right) \\ c_n &= 2 \left(D_n \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i \right) \left(\sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i \right) + s_n \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i \right) \right) - \sum_{i=1}^{N_{ps}} \lambda_i s_i^{(2)} \\ d_n &= -2s_n \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i \right) \left(\sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i \right) \end{aligned} \quad (32)$$

Para la solución de ecuaciones de tercer grado existe una buena solución simbólica, por ejemplo, aplicando la ecuación de Cardano. Matemáticamente, la ecuación (31) tiene tres soluciones. A fin de determinar la solución correcta entre ellas, ha de considerarse el límite de estabilidad del sistema de cola de espera, es decir:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i < C_n \quad (33)$$

A fin de entregar los paquetes con un retardo de paquetes finito, la capacidad del sistema no puede ser inferior a la velocidad total de llegada.

4.3 Determinación de las necesidades de espectro

El procedimiento de cálculo de las necesidades de espectro se atiene a los siguientes pasos:

Paso 1: El cálculo de capacidad se ha hecho hasta ahora separadamente para enlaces ascendentes y descendentes. Los requisitos de capacidad de enlaces ascendentes y descendentes se suman por separado para las necesidades de capacidad de paquetes conmutados y circuitos conmutados, o sea:

$$C_{d,t,rat,p,cs} = C_{d,t,rat,p,cs,UL} + C_{d,t,rat,p,cs,DL} \quad (34)$$

$$C_{d,t,rat,p,pcs} = C_{d,t,rat,p,ps,UL} + C_{d,t,rat,p,ps,DL} \quad (35)$$

Paso 2: Las necesidades de capacidad de circuitos conmutados y paquetes conmutados se combinan en el tráfico, es decir:

$$C_{d,t,rat,p} = C_{d,t,rat,p,cs} + C_{d,t,rat,p,ps} \quad (36)$$

donde $C_{d,t,rat,p,cs}$ (bit/(s · célula)) representa la necesidad de capacidad del tráfico de circuitos conmutados en la teledensidad d , el intervalo de tiempo t , el GTAR rat y el entorno p , mientras que $C_{d,t,rat,p,ps}$ (bit/(s · célula)) representa la correspondiente necesidad de capacidad para el tráfico de paquetes conmutados.

En el caso de requisitos de capacidad en el multidifusión móvil, el cálculo es, analógicamente, la suma de las necesidades de capacidad de multidifusión de paquetes y circuitos conmutados.

Paso 3: La necesidad de espectro para el GTAR rat en la teledensidad d , el intervalo de tiempo t y el entorno radioeléctrico p se calculan aplicando factores de eficacia espectral de la superficie, que se deducen del Cuadro 11. La necesidad de espectro se obtiene de:

$$F_{d,t,rat,p} = \frac{C_{d,t,rat,p}}{\eta_{d,rat,p}} \quad (37)$$

donde $\eta_{d,rat,p}$ (bit/(s · Hz · célula)) representa la eficacia espectral de la superficie en la teledensidad d , el GTAR rat y el entorno radioeléctrico del Cuadro 11.

En el caso de necesidades de capacidad de multidifusión móvil, la necesidad espectral correspondiente $F_{d,rat,p,mm}$ se calcula por separado, utilizando el valor de eficacia espectral apropiado $\eta_{d,rat,p}$ del Cuadro 11. Seguidamente se añade esta necesidad de espectro a la necesidad espectral de la comunicación individual de usuario:

$$F_{d,t,rat,p} = F_{d,t,rat,p} + F_{d,t,rat,p,mm} \quad (38)$$

5 Aplicación de los necesarios ajustes

En el Paso 7 de la Fig. 1, las necesidades de espectro se suman a lo largo de los entornos radioeléctricos. Se efectúan ajustes para tener en cuenta la necesidad mínima de espectro para la implantación de una red, las bandas de guarda necesarias y el efecto del número de operadores.

El procedimiento de aplicación de los ajustes necesarios se atiene a los siguientes pasos:

Paso 1: Se supone que no hay compartición temporal de espectro, la llamada FSU, dentro de un GTAR entre operadores, ya que en una TAR la carga de tráfico no debería variar demasiado entre los operadores, salvo que éstos atiendan segmentos del mercado considerablemente diferentes. En consecuencia, suponemos que la distribución del espectro

entre los operadores dentro de un GTAR es fija. Suponemos, además, que cada operador tiene a su disposición la misma porción del espectro total. Por lo tanto, el espectro sin ajustar por operador es:

$$F_{d,t,rat,p} = F_{d,t,rat,p}/N_o \quad (39)$$

donde N_o es el número de operadores que figuran en los Cuadros 10a a 10b.

Paso 2: Por lo general, sólo puede utilizarse el espectro con una granularidad $GRNSpec_{rat,p}$ y una anchura de banda mínima $MinSpec_{rat,p}$, requerida para poder atribuir una sola portadora a cada célula en una red de superficie grande, teniendo en cuenta el factor de reutilización de frecuencias. De ahí que la necesidad de espectro deba ajustarse:

$$F_{d,t,rat,p} = 0 \quad \text{si } F_{d,t,rat,p} = 0$$

$$F_{d,t,rat,p} = MinSpec_{rat,p} \quad \text{si } 0 < F_{d,t,rat,p} \leq MinSpec_{rat,p}$$

$$F_{d,t,rat,p} = MinSpec_{rat,p} + GrnSpec_{rat,p} \cdot \lceil (F_{d,t,rat,p} - MinSpec_{rat,p}) / GrnSpec_{rat,p} \rceil \quad \text{si } MinSpec_{rat,p} < F_{d,t,rat,p} \quad (40)$$

donde $\lceil \rceil$ significa aproximación al primer entero superior y $MinSpec_{rat,p}$ y $GrnSpec_{rat,p}$ se obtiene de los Cuadros 10a y 10b. Obsérvese que también para los futuros GTAR será necesario reservar un mínimo de anchura de banda de la portadora, en función del requisito de soporte de la velocidad de datos del usuario máxima que se busca.

NOTA 1 – Ha de tenerse cuidado al seleccionar los parámetros iniciales al emplear esta metodología, considerando que la estimación de espectro calculada puede ser particularmente sensible a ciertos parámetros. En particular, el efecto de la implantación mínima de espectro por operador del GTAR 2 debe examinarse cuidadosamente, ya que el valor de este parámetro es grande y podría producir una estimación de necesidades de espectro mayores de las que se requerirían para el volumen de tráfico en el mercado, de seleccionarse anchuras de banda de canal más estrechas. También la elección del tamaño de las células debe corresponder a la velocidad de datos, la anchura de banda del canal y otros parámetros, que afecta al presupuesto del enlace. Además, la implantación mínima de espectro por operador debe corresponder también a las velocidades binarias medias del servicio utilizado en el cálculo.

Paso 3: Para GTAR 1 se supone que los entornos de picocélulas y células de punto caliente no coexisten en el espacio. Por consiguiente, han de considerarse los máximos de ambos entornos radioeléctricos. Se supone que los entornos de macrocélulas y microcélulas coexisten en el espacio con entornos de picocélulas y de células de punto caliente, respectivamente. Por ello, para RATG 1 las necesidades de espectro de entornos de macrocélulas y microcélulas deben añadirse al máximo de los entornos radioeléctricos de picocélulas y de células de punto caliente:

$$F_{d,t,rat} = F_{d,rat,macro} + F_{d,t,rat,micro} + \text{máx}(F_{d,t,rat,pico}, F_{d,t,rat,punto\ caliente}) \quad (41a)$$

Para GTAR 2, la reciente aparición de redes heterogéneas está haciendo que distintos tipos de células puedan implantarse en el mismo espectro de manera más eficaz de lo previsto. Por consiguiente, para GTAR 2 los requisitos de espectro de los máximos entornos de macrocélulas y microcélulas se han de añadir al máximo de los entornos de picocélulas y de células de punto caliente:

$$F_{d,t,rat} = \text{máx}(F_{d,t,rat,macro}, F_{d,t,rat,micro}) + \text{máx}(F_{d,t,rat,pico}, F_{d,t,rat,hotspot}) \quad (41b)$$

Luego, la necesidad total de espectro para todos los operadores es:

$$F_{d,t,rat} = F_{d,t,rat} \cdot N_o \quad (42)$$

Paso 4: Seguidamente se consideran las bandas de guarda. Se supone que las cifras de eficacia espectral ya tienen en cuenta una banda de guarda necesaria entre portadoras del mismo operador. Esto quiere decir que las cifras de eficacia espectral también se basan en la hipótesis de que o bien la portadora adyacente no tiene influencia o bien su influencia ya está comprendida en la cifra de eficacia espectral. La banda de guarda *entre* operadores introduce necesidades de espectro adicionales:

$$F_{d,t,rat} = F_{d,t,rat} + (N_o - 1) \cdot G_{rat} \quad (43)$$

donde los valores de banda de guarda entre operadores G_{rat} son valores iniciales de los Cuadros 10a y 10b.

6 Cálculo de las necesidades totales de espectro

En el último bloque de cálculo, se suman las necesidades de espectro a lo largo de los intervalos de tiempo y teledensidades.

Paso 1: Se considera la dependencia temporal de la necesidad de espectro. Las dos opciones que aquí se describen, a) y b), se refieren al cálculo de las necesidades de espectro con o sin la posibilidad de utilización flexible del espectro. El cálculo sin esta posibilidad, caso a), entre cualesquiera GTAR, permite calcular las necesidades de espectro específicas a un GTAR, mientras que el cálculo con la posibilidad de utilización flexible del espectro, caso b), produce las necesidades de espectro para todos los GTAR, capaces de utilizar la función FSU.

- a) A esta altura cabe recordar que las necesidades de espectro siguen dependiendo del tiempo. Sin FSU, la necesidad de espectro de un GTAR *rat* en la teledensidad *d* corresponde al valor máximo en el tiempo:

$$F_{d,rat} = \max_t (F_{d,t,rat}) \quad (44)$$

Se adopta el mayor valor de todos los intervalos de tiempo *t*.

- b) Con la posibilidad FSU entre GTAR, la demanda total de espectro para dichos GTAR dotados de FSU se calcula sumando las demandas de espectro de cada TAR, para cada teledensidad por separado. También se incluye un factor de imperfección de FSU, tomado de los Cuadros 10a y 10b, para tener en cuenta toda imperfección producida en el sistema FSU, que traerá aparejado un aumento de la demanda de espectro:

$$F_{d,t,FSU} = FSU_{marg} \cdot \sum_{rat \in \{FSU \text{ RATs}\}} F_{d,t,rat} \quad (45)$$

Seguidamente se utiliza el operador máximo para seleccionar las mayores necesidades de espectro en todo tiempo. La necesidad de espectro para los GTAR que soportan FSU es:

$$F_{d,FSU} = \max_t (F_{d,t,FSU}) \quad (46)$$

Las necesidades de espectro para las TAR que no soportan FSU se obtienen mediante:

$$F_{d,rat,nonFSU} = \max_t (F_{d,t,rat}); rat \notin \{FSU \text{ RATs}\} \quad (47)$$

Paso 2: Los entornos de teledensidad son superficies de espacio no solapadas, por lo que el entorno de teledensidad de mayor demanda espectral determina la necesidad de espectro para un GTAR.

- a) Sin FSU, la necesidad de espectro para un GTAR *rat* es:

$$F_{rat} \text{ máx}_d = (F_{d, rat}) \quad (48)$$

- b) Con FSU, la necesidad de espectro será:

$$F_{rat, nonFSU} = \text{máx}_d (F_{d, rat, nonFSU}), \text{ y } F_{FSU} = \text{máx}_d (F_{d, FSU}) \quad (49)$$

Paso 3: Se recuerda que el cálculo dentro de la región de atribución espectral puede haberse realizado a partir de estudios de mercado diferentes, según las regiones geográficas. Allí donde se requiere una estimación común para un grupo de países, debe considerarse el máximo de las necesidades de espectro de cada país en el estudio de mercado.

- a) Sin FSU, el espectro necesario para un GTAR *rat* es el máximo de todos los estudios regionales y de mercado:

$$F_{rat} = \text{máx}(F_{rat}) \quad (50)$$

- b) Con FSU, el espectro requerido para un GTAR *rat* es el máximo obtenido de todos los estudios regionales y de mercado:

$$F_{rat, nonFSU} = \text{máx}(F_{rat, nonFSU}) \text{ y } F_{FSU} = \text{máx}(F_{FSU}) \quad (51)$$

Paso 4: Optativamente, como último paso, el espectro requerido total está representado en el Paso 8 de la Fig. 1.

- a) Sin la posibilidad FSU, la suma de las demandas de GTAR es:

$$F = \sum_{rat} F_{rat} \quad (52)$$

- b) Con la posibilidad FSU, el espectro para los GTAR que soportan la función FSU y los GTAR que no soportan dicha función se suman, dando lugar a:

$$F = F_{FSU} + \sum_{rat \notin \{FSU \text{ RATs}\}} F_{rat, nonFSU} \quad (53)$$

7 Resumen

La presente Recomendación ofrece una metodología de cálculo de las necesidades espectrales con vistas al ulterior desarrollo de las IMT. La metodología adapta una compleja combinación de servicios extraídos de estudios de mercado y categorías de servicio de diverso volumen de tráfico y limitaciones propias de calidad de servicio. La metodología tiene en cuenta las variaciones temporales y regionales del tráfico. Aplica un criterio tecnológicamente neutral para responder al surgimiento y establecimiento de sistemas que utilizan el enfoque de GTAR, con un conjunto reducido de parámetros radioeléctricos. Los cuatro GTAR considerados abarcan todas las tecnologías de acceso radioeléctrico. La metodología distribuye el tráfico entre los distintos GTAR y entornos radioeléctricos sobre la base de las informaciones técnicas de mercado. Para los GTAR 3 y GTAR 4 no se calcula ninguna necesidad de espectro. Para el tráfico distribuido a los GTAR 1 y GTAR 2, la metodología transforma los volúmenes de tráfico provenientes de estudios de mercado

en necesidades de capacidad mediante algoritmos específicos, ya sea para categorías de servicios de paquetes conmutados o de circuitos conmutados (procedimiento de reserva), y tiene en cuenta además la ganancia producida en los servicios gracias a la multiplexión de paquetes con diversas características de calidad de servicio. La metodología transforma las necesidades de capacidad en necesidades de espectro mediante valores de eficacia de espectro. Considera implantaciones prácticas de redes para ajustar las necesidades de espectro y calcula las necesidades totales de espectro para un ulterior desarrollo de las IMT.

Referencias

- KLEINROCK, L. [1975] *Queueing Systems. Volume 1: Theory*. John Wiley & Sons, Estados Unidos de América.
- KAUFMAN, J.S. [octubre de 1981] Blocking in a shared resource environment. *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-29, **10**, p. 1474-1481.
- ROBERTS, J.W. [1981] A service system with heterogeneous user requirements. *Perf. of Data Commun. Sys. and their Applications*. G. Pujolle (Ed.), p. 423-431, North-Holland.
- TAKAGI, H., YOSHINO, H., MATOBA, N. y AZUMA, M. [2005] Methodology for calculation of spectrum requirements for the next generation mobile communication systems. Presentado a *IEICE Trans.* (en idioma japonés).
- KLEINROCK, L. [1976] *Queueing Systems. Volume 2: Computer Applications*. John Wiley and Sons, Estados Unidos de América.
- COBHAM, A. [1954] Priority assignments in waiting line problems. *Operations Research*, Vol. 2, **1** p. 70-76.
- IRNICH, T. y WALKE, B. [del 5 al 8 de septiembre de 2004] *Spectrum estimation methodology for next generation wireless systems*. PIMRC Barcelona, España.

Apéndice 1 al Anexo 1

Lista de abreviaturas y símbolos

Abreviatura:	Descripción:
2G	Segunda generación
AoD	Audio por demanda
BER	Proporción de bit erróneos
CS	Categoría de servicio
CS	Conmutación de circuitos
ER	Entorno radioeléctrico
ES	Entorno de servicio
FCFS	Principio de la prioridad en el tiempo
FSU	Utilización flexible del espectro
FTTH	Fibra hasta el hogar
GTAR	Grupo de técnicas de acceso radioeléctrico
IMT-2000	Telecomunicaciones Móviles Internacionales-2000
IP	Protocolo de Internet
LAN	Red de área local
M/G/1	Cola de espera de Poisson para servidor único de servicios generales de entrada
PAN	Red de área personal
PS	Conmutación de paquetes
QoS	Calidad de servicio
RAN	Red de acceso radioeléctrico
TAR	Técnica de acceso radioeléctrico
VoD	Vídeo por demanda
VoIP	Protocolo de transmisión de voz por Internet
xDSL	Línea de abonado digital <i>x</i>

Símbolo:	Descripción:	Unidad:
a_n	Coefficiente	–
$A_{d,p}$	Superficie de célula del entorno radioeléctrico p en la teledensidad d	km ²
b_n	Coefficiente	–
B_n	Probabilidad de bloqueo de servicio con conmutación de circuitos (procedimiento de reserva) categoría n	–
c_n	Coefficiente	–
$C_{d,t,rat,p}$	Requisito de capacidad en teledensidad d e intervalo de tiempo t para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	bit/s/célula
$C_{d,t,rat,p,cs}$	Requisito de capacidad para conmutación de circuitos en teledensidad d e intervalo de tiempo t para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	bit/s/célula
$C_{d,t,rat,p,cs,DL}$	Requisito de capacidad para conmutación de circuitos para enlaces descendentes en teledensidad d e intervalo de tiempo t para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	bit/s/célula
$C_{d,t,rat,p,cs,UL}$	Requisito de capacidad para conmutación de circuitos para enlaces ascendentes en teledensidad d e intervalo de tiempo t para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	bit/s/célula
$C_{d,t,rat,p,ps}$	Requisito de capacidad para conmutación de paquetes para teledensidad d e intervalo de tiempo t para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	bit/s/célula
$C_{d,t,rat,p,ps,DL}$	Requisito de capacidad para conmutación de paquetes para enlace descendente en teledensidad d e intervalo de tiempo t para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	bit/s/célula
$C_{d,t,rat,p,ps,UL}$	Requisito de capacidad para conmutación de paquetes para enlace ascendente en teledensidad d e intervalo de tiempo t para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	bit/s/célula
d	Índice de teledensidad	–
d_n	Coefficiente	–
D_n	Retardo medio requerido de la categoría de servicio n	s/paquete
$F_{d,rat}$	Necesidad de espectro total para GTAR rat en teledensidad d	Hz
$F_{d,FSU}$	Necesidad de espectro total para GTAR con función FSU en teledensidad d	Hz
$F_{d,rat,nonFSU}$	Necesidad de espectro total para GTAR rat sin FSU en teledensidad d	Hz
$F_{d,t,FSU}$	Necesidad de espectro total para GTAR con FSU en teledensidad d e intervalo de tiempo t	Hz
$F_{d,t,rat}$	Necesidad de espectro total para GTAR rat en teledensidad d e intervalo de tiempo t	Hz

Símbolo:	Descripción:	Unidad:
$F_{d,t,rat,p}$	Necesidad de espectro para GTAR rat en teledensidad d , intervalo de tiempo t y entorno radioeléctrico p	Hz
$F_{d,t,rat,p,mm}$	Necesidad de espectro para multidifusión móvil en GTAR rat , teledensidad d , intervalo de tiempo t y entorno radioeléctrico p	Hz
F	Necesidad espectral total para todos los GTAR	Hz
F_{FSU}	Necesidad de espectro para los GTAR con FSU	Hz
F_{rat}	Necesidad de espectro para GTAR rat sin FSU	Hz
$F_{rat,nonFSU}$	Necesidad de espectro para GTAR rat sin FSU	Hz
FSU_{marg}	Margen de imperfección de FSU (multiplicador)	–
G	Función intermedia para cálculo de probabilidades de bloqueo	–
G_{rat}	Banda de guarda entre operadores para GTAR rat	Hz
$GrnSpec_{rat,p}$	Granularidad por operador para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	Hz
i	Vector de estado del sistema en el cálculo de capacidad de circuitos conmutados	–
i_m	Número de llamadas de clase m que están ocupando canales en el cálculo de capacidad de circuitos conmutados	–
J_m	Parámetro de exploración de clases de movilidad	–
K	Índice de canal en el cálculo de capacidad de circuitos conmutados	–
M	Índice de entorno de servicio	–
$MR_{sm,t,n}$	Coefficiente de movilidad estacionaria/peatonal de la metodología para la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	%
$MR_{lm,t,n}$	Baja movilidad de la metodología para la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	%
$MR_{hm,t,n}$	Alta movilidad de la metodología para la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	%
$MR_{market_{m,s}}$	Coefficiente de movilidad del estudio de mercado para servicio s en el entorno de servicio m	%
$MR_{market_{m,t,n}}$	Coefficiente de movilidad del estudio de mercado para la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	%
$MR_{market_{sm,t,n}}$	Coefficiente de movilidad estacionaria del estudio de mercado para la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	%

Símbolo:	Descripción:	Unidad:
$MR_market_lm_{m,t,n}$	Coefficiente de movilidad baja del estudio de mercado para categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	%
$MR_market_hm_{m,t,n}$	Alta movilidad del estudio de mercado para la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	%
$MR_market_shm_{m,t,n}$	Movilidad súper alta del estudio de mercado para la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	%
$MinSpec_{rat,p}$	Valor mínimo por operador para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	Hz
n	Índice de categoría de servicio	–
N	Número total de categorías de servicio	–
N_{cs}	Número de categorías de servicio con conmutación de circuitos (procedimiento de reserva)	–
N_o	Número de operadores	–
$N_{ps'}$	Número de categorías de servicio con conmutación de paquetes	–
p	Índice de entorno radioeléctrico	–
P	Función intermedia de cálculo de probabilidad de bloqueo	
$P_{m,t,n,rat,p}$	Velocidad de llegada de sesión por zona para categoría de servicio n , en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t , para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	sesiones/s/km ²
$P'_{m,t,n,rat,p}$	Velocidad de llegada de sesión por célula para la categoría de servicio n , en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t , para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	sesiones/s/célula
$Q_{m,t,s}$	Velocidad de llegada de sesión por usuario para el servicio s en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	sesiones/s/usuario
$Q_{m,t,n}$	Velocidad de llegada de sesión por usuario n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	sesiones/s/usuario
R	Velocidad unitaria de datos en el cálculo de capacidad para el tráfico de circuitos conmutados	bit/s
$r_{d,t,n,rat,p}$	Velocidad binaria media de servicio para la categoría de servicio n en la teledensidad de intervalo e intervalo de tiempo t , para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	bit/s
$r_{m,t,n}$	Velocidad binaria media de servicio para la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	bit/s

Símbolo:	Descripción:	Unidad:
$r_{m,t,s}$	Velocidad binaria media de servicio para el servicio n en el entorno de servicio m	bit/s
rat	Índice de grupos de técnicas de acceso radioeléctrico	–
S	Índice de servicio	–
s_n	Medio de distribución de tamaños de paquetes para la categoría de servicio n	bit/paquete
$s_n^{(2)}$	Segundo momento de la distribución de tamaños de paquetes para la categoría de servicio n	(bit/paquete) ²
t	Índice de intervalo de tiempo	–
$T_{d,t,n,rat,p}$	Volumen de tráfico total para la categoría de servicio n en la teledensidad d e intervalo de tiempo t , para GTAR rat en el entorno radioeléctrico p	bit/s/célula
$U_{m,t,s}$	Densidad de usuarios para el servicio s en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	usuarios/km ²
$U_{m,t,n}$	Densidad de usuarios para la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	usuarios/km ²
$w_{m,t,s}$	Ponderación de la duración de sesión media para el servicio s en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	–
$\bar{w}_{m,t,s}$	Ponderación de la velocidad binaria media de servicio o del coeficiente de movilidad para el servicio s en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	–
$X_{punto\ caliente}$	Porcentaje de cobertura de células de punto caliente	%
X_{macro}	Porcentaje de cobertura de macrocélulas	%
X_{micro}	Porcentaje de cobertura de microcélulas	%
X_{pico}	Porcentaje de cobertura de picocélulas	%
$\eta_{d,rat,p}$	Eficacia espectral del GTAR rat en la teledensidad d del entorno radioeléctrico p	bit/s/Hz/célula
κ	Cantidad requerida de canales por célula	
$\lambda_{d,t,n,rat,p}$	Velocidad de llegada de paquetes de la categoría de servicio n en la teledensidad d e intervalo de tiempo t , para GTAR rat del entorno radioeléctrico p	paquete/s
λ_n	Velocidad de llegada de paquetes de la categoría de servicio n	paquete/s
$\lambda_{\leq N_{ps}}$	Velocidad total de llegada de paquetes de todas las categorías de servicio	paquete/s
$\mu_{m,t,s}$	Duración media de sesión del servicio s en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	s/sesión
$\mu_{m,t,n}$	Duración media de sesión de la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t	s/sesión

Símbolo:	Descripción:	Unidad:
v_n	Cantidad de canales requerida para la categoría de servicio n con conmutación de circuitos	—
v	Vector con cantidades de canales requeridas para las categorías de servicio con conmutación de circuitos	—
$\xi_{\text{punto caliente}}$	Coefficiente intermedio de distribución de células de punto caliente	—
ξ_{macro}	Coefficiente intermedio de distribución de macrocélulas	—
ξ_{micro}	Coefficiente intermedio de distribución de microcélulas	—
ξ_{pico}	Coefficiente intermedio de distribución de picocélulas	—
$\xi_{\text{pico\&punto caliente}}$	Coefficiente intermedio de distribución de picocélulas y células de punto caliente	—
$\xi_{m,t,n, \text{rat}, p}$	Coefficiente intermedio de distribución de la categoría de servicio n en el entorno de servicio m e intervalo de tiempo t para GTAR rat del entorno radioeléctrico p	—
π_n	Máximo admisible de probabilidad de bloqueo para la categoría n de servicio con conmutación de circuitos	—
$\rho_{d,t,n, \text{rat}, p}$	Tráfico ofrecido por célula para la categoría de servicio n en la teledensidad d e intervalo de tiempo t , para el GTAR rat del entorno radioeléctrico p	Erlang/célula
