

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN
DE LAS TELECOMUNICACIONES
DE LA UIT

Y.3021

(01/2012)

SERIE Y: INFRAESTRUCTURA MUNDIAL DE LA
INFORMACIÓN, ASPECTOS DEL PROTOCOLO
INTERNET Y REDES DE LA PRÓXIMA GENERACIÓN

Redes futuras

Marco de ahorro de energía en las redes futuras

Recomendación UIT-T Y.3021

RECOMENDACIONES UIT-T DE LA SERIE Y
**INFRAESTRUCTURA MUNDIAL DE LA INFORMACIÓN, ASPECTOS DEL PROTOCOLO INTERNET
Y REDES DE LA PRÓXIMA GENERACIÓN**

INFRAESTRUCTURA MUNDIAL DE LA INFORMACIÓN	
Generalidades	Y.100–Y.199
Servicios, aplicaciones y programas intermedios	Y.200–Y.299
Aspectos de red	Y.300–Y.399
Interfaces y protocolos	Y.400–Y.499
Numeración, direccionamiento y denominación	Y.500–Y.599
Operaciones, administración y mantenimiento	Y.600–Y.699
Seguridad	Y.700–Y.799
Características	Y.800–Y.899
ASPECTOS DEL PROTOCOLO INTERNET	
Generalidades	Y.1000–Y.1099
Servicios y aplicaciones	Y.1100–Y.1199
Arquitectura, acceso, capacidades de red y gestión de recursos	Y.1200–Y.1299
Transporte	Y.1300–Y.1399
Interfuncionamiento	Y.1400–Y.1499
Calidad de servicio y características de red	Y.1500–Y.1599
Señalización	Y.1600–Y.1699
Operaciones, administración y mantenimiento	Y.1700–Y.1799
Tasación	Y.1800–Y.1899
Televisión IP sobre redes de próxima generación	Y.1900–Y.1999
REDES DE LA PRÓXIMA GENERACIÓN	
Marcos y modelos arquitecturales funcionales	Y.2000–Y.2099
Calidad de servicio y calidad de funcionamiento	Y.2100–Y.2199
Aspectos relativos a los servicios: capacidades y arquitectura de servicios	Y.2200–Y.2249
Aspectos relativos a los servicios: interoperabilidad de servicios y redes en las redes de la próxima generación	Y.2250–Y.2299
Mejoras de las NGN	Y.2300–Y.2399
Gestión de red	Y.2400–Y.2499
Arquitecturas y protocolos de control de red	Y.2500–Y.2599
Redes basadas en paquetes	Y.2600–Y.2699
Seguridad	Y.2700–Y.2799
Movilidad generalizada	Y.2800–Y.2899
Entorno abierto con calidad de operador	Y.2900–Y.2999
REDES FUTURAS	Y.3000–Y.3499
COMPUTACIÓN EN LA NUBE	Y.3500–Y.3999

Para más información, véase la Lista de Recomendaciones del UIT-T.

Recomendación UIT-T Y.3021

Marco de ahorro de energía en las redes futuras

Resumen

La Recomendación UIT-T Y.3021 describe el marco para el ahorro de energía en las redes futuras. En primer lugar se describe la necesidad de ahorrar energía en las redes propiamente dichas y se analizan las posibles tecnologías de ahorro energético. A continuación se identifican las principales funciones y sus interacciones cíclicas, se analizan las posibles repercusiones de introducir ciertas tecnologías de ahorro energético y se enumeran los requisitos de alto nivel para la introducción de tales tecnologías.

Historia

Edición	Recomendación	Aprobación	Comisión de Estudio	ID único*
1.0	ITU-T Y.3021	2012-01-13	13	11.1002/1000/11446

* Para acceder a la Recomendación, sírvase digitar el URL <http://handle.itu.int/> en el campo de dirección del navegador, seguido por el identificador único de la Recomendación. Por ejemplo, <http://handle.itu.int/11.1002/1000/11830-en>.

PREFACIO

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) es el organismo especializado de las Naciones Unidas en el campo de las telecomunicaciones y de las tecnologías de la información y la comunicación. El Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (UIT-T) es un órgano permanente de la UIT. Este órgano estudia los aspectos técnicos, de explotación y tarifarios y publica Recomendaciones sobre los mismos, con miras a la normalización de las telecomunicaciones en el plano mundial.

La Asamblea Mundial de Normalización de las Telecomunicaciones (AMNT), que se celebra cada cuatro años, establece los temas que han de estudiar las Comisiones de Estudio del UIT-T, que a su vez producen Recomendaciones sobre dichos temas.

La aprobación de Recomendaciones por los Miembros del UIT-T es el objeto del procedimiento establecido en la Resolución 1 de la AMNT.

En ciertos sectores de la tecnología de la información que corresponden a la esfera de competencia del UIT-T, se preparan las normas necesarias en colaboración con la ISO y la CEI.

NOTA

En esta Recomendación, la expresión "Administración" se utiliza para designar, en forma abreviada, tanto una administración de telecomunicaciones como una empresa de explotación reconocida de telecomunicaciones.

La observancia de esta Recomendación es voluntaria. Ahora bien, la Recomendación puede contener ciertas disposiciones obligatorias (para asegurar, por ejemplo, la aplicabilidad o la interoperabilidad), por lo que la observancia se consigue con el cumplimiento exacto y puntual de todas las disposiciones obligatorias. La obligatoriedad de un elemento preceptivo o requisito se expresa mediante las frases "tener que, haber de, hay que + infinitivo" o el verbo principal en tiempo futuro simple de mandato, en modo afirmativo o negativo. El hecho de que se utilice esta formulación no entraña que la observancia se imponga a ninguna de las partes.

PROPIEDAD INTELECTUAL

La UIT señala a la atención la posibilidad de que la utilización o aplicación de la presente Recomendación suponga el empleo de un derecho de propiedad intelectual reivindicado. La UIT no adopta ninguna posición en cuanto a la demostración, validez o aplicabilidad de los derechos de propiedad intelectual reivindicados, ya sea por los miembros de la UIT o por terceros ajenos al proceso de elaboración de Recomendaciones.

En la fecha de aprobación de la presente Recomendación, la UIT no ha recibido notificación de propiedad intelectual, protegida por patente, que puede ser necesaria para aplicar esta Recomendación. Sin embargo, debe señalarse a los usuarios que puede que esta información no se encuentre totalmente actualizada al respecto, por lo que se les insta encarecidamente a consultar la base de datos sobre patentes de la TSB en la dirección <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© 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.

ÍNDICE

	Página
1 Alcance	1
2 Referencias	1
3 Definiciones.....	1
3.1 Términos definidos en otros documentos.....	1
3.2 Términos definidos en la presente Recomendación	1
4 Siglas y acrónimos.....	2
5 Convenios	3
6 Introducción.....	3
6.1 Antecedentes y motivación.....	3
6.2 Etapas de la vida útil y niveles que se han de considerar	4
7 Análisis de las tecnologías de ahorro de energía	4
7.1 Lista de tecnologías y sus niveles.....	4
7.2 Tecnologías a nivel de dispositivo	5
7.3 Tecnologías a nivel de equipo	6
7.4 Tecnologías a nivel de red	8
8 Consideraciones relativas al ahorro de energía	11
8.1 Ámbito objeto de la presente Recomendación	11
8.2 Formas de ahorrar energía	12
8.3 Control del dispositivo y/o equipo en función de la dinámica del tráfico.....	13
8.4 Retransmisión de tráfico con menor potencia	14
8.5 Clasificación de cada tecnología	14
9 Posibles funciones y sus interacciones	15
9.1 Posibles funciones	15
9.2 Modelos de combinación de funciones	17
10 Análisis de las repercusiones del ahorro de energía	19
10.1 Efectos sobre la calidad de funcionamiento de la red	19
10.2 Efectos sobre la configuración del servicio.....	19
11 Requisitos de alto nivel.....	20
12 Consideraciones medioambientales.....	21
13 Consideraciones relativas a la seguridad	21
Bibliografía	22

Recomendación UIT-T Y.3021

Marco de ahorro de energía en las redes futuras

1 Alcance

A fin de ahorrar energía en las redes futuras (FN), la presente Recomendación:

- describe la necesidad de ahorrar energía;
- examina las posibles tecnologías;
- identifica los diversos aspectos que se han de considerar;
- indica las principales funciones y sus interacciones cíclicas;
- analiza las posibles repercusiones de introducir estas tecnologías, y
- enumera los requisitos de alto nivel.

El marco y las ideas que se describen en la presente Recomendación pueden igualmente aplicarse y ser útiles para otras redes que no pertenecen a la categoría de redes futuras, si bien la descripción corresponde al reconocimiento íntegro de los objetivos y parámetros de diseño de las redes futuras [UIT-T Y.3001].

2 Referencias

Las siguientes Recomendaciones del UIT-T y otras referencias contienen disposiciones que, mediante su referencia en este texto, constituyen disposiciones de la presente Recomendación. Al efectuar esta publicación, estaban en vigor las ediciones indicadas. Todas las Recomendaciones y otras referencias son objeto de revisiones por lo que se preconiza que los usuarios de esta Recomendación investiguen la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las Recomendaciones y otras referencias citadas a continuación. Se publica periódicamente una lista de las Recomendaciones UIT-T actualmente vigentes. En esta Recomendación, la referencia a un documento, en tanto que autónomo, no le otorga el rango de una Recomendación.

[ITU-T L.1400] Recomendación UIT-T L.1400 (2011), *Descripción y principios generales de las metodologías para la evaluación del impacto ambiental de las TIC*.

[ITU-T Y.3001] Recomendación UIT-T Y.3001 (2011), *Redes futuras: Objetivos y parámetros de diseño*.

3 Definiciones

3.1 Términos definidos en otros documentos

En la presente Recomendación se utilizan los siguientes términos definidos en otros documentos:

3.1.1 redes futuras (FN) [UIT-T Y.3001]: Red capaz de ofrecer servicios, capacidades y funcionalidades difíciles de proporcionar con las tecnologías de red existentes.

3.2 Términos definidos en la presente Recomendación

En la presente Recomendación se definen los siguientes términos:

3.2.1 dispositivo: Módulo físico o montaje de dichos módulos concebido para realizar una determinada función.

3.2.2 ahorro de energía en las redes: Redes cuyas capacidades de red y sus operaciones están configuradas de manera que el equipo de red utiliza sistemáticamente la energía de manera eficiente

y, por consiguiente, el consumo de energía es menor que el comparado con las redes sin dichas capacidades y operaciones.

NOTA – Por equipo de red se entiende encaminadores, conmutadores, equipos en el punto de terminación (por ejemplo, unidades de red ópticas, ONU), pasarelas domésticas y servidores de red, tales como repartidores de carga y cortafuegos. El equipo de red suele estar integrado por diversos componentes, tales como una estructura de conmutadores, tarjetas de línea, fuentes de alimentación y refrigeración.

3.2.3 equipo: Conjunto de dispositivos ensamblados para formar una entidad física que realiza una tarea específica.

3.2.4 eficiencia energética de la red: Caudal o volumen de información que fluye en la red dividido por la energía consumida.

NOTA – Normalmente se expresa en bps/W.

4 Siglas y acrónimos

En la presente Recomendación se utilizan las siguientes siglas y acrónimos:

ALR	Velocidad del enlace adaptativa (<i>adaptive link rate</i>)
BTS	Estación de base transceptora (<i>base transceiver station</i>)
CAM	Memoria de contenido direccionable (<i>content addressable memory</i>)
CAPWAP	Control y configuración de puntos de acceso inalámbricos (<i>control and provisioning of wireless access points</i>)
CDN	Red de entrega de contenido (<i>content delivery network</i>)
CPU	Unidad de procesamiento central (<i>central processing unit</i>)
DDoS	Denegación del servicio distribuida (<i>distributed denial-of-service</i>)
DPD	Predistorsión digital (<i>digital pre-distortion</i>)
DVS	Reducción dinámica de la tensión (<i>dynamic voltage scaling</i>)
FN	Red futura (<i>future network</i>)
GHG	Gas de efecto invernadero (<i>greenhouse gas</i>)
HVHBT	Transistor bipolar de heterounión de alta tensión (<i>high voltage heterojunction bipolar transistor</i>)
TIC	Tecnologías de la información y la comunicación (<i>information and communication technology</i>)
LSI	Gran densidad de integración (<i>large scale integration</i>)
MIMO	Entradas múltiples, salidas múltiples (<i>multiple input multiple output</i>)
MPLS	Conmutación por etiquetas multiprotocolo (<i>multi-protocol label switching</i>)
NIC	Tarjeta de interfaz de red (<i>network interface card</i>)
ONU	Unidad de red óptica (<i>optical network unit</i>)
PA	Amplificador de potencia (<i>power amplifier</i>)
PC	Computador personal (<i>personal computer</i>)
SINR	Relación señal a interferencia y ruido (<i>signal to interference and noise ratio</i>)
SISO	Entrada simple, salida simple (<i>single-input single-output</i>)
SLA	Acuerdo sobre el nivel de servicio (<i>service level agreement</i>)

SRAM	Memoria estática de acceso aleatorio (<i>static random access memory</i>)
UE	Equipo de usuario (<i>user equipment</i>)
WLAN	Red inalámbrica de área local (<i>wireless local area network</i>)

5 Convenios

Ninguno.

6 Introducción

6.1 Antecedentes y motivación

El ahorro de energía en el campo de la tecnología de la información y la comunicación (TIC) es un asunto importante, que ya se ha tenido en cuenta en el diseño de las redes futuras [UIT-T Y.3001]. Uno de los objetivos fundamentales de las redes futuras es manifestar sensibilidad medioambiental, que se puede conseguir mediante tecnologías de ahorro de energía. Tradicionalmente el ahorro de energía se estudiaba con el fin de beneficiar al usuario o empresa, por ejemplo para reducir el gasto en energía o para gestionar la temperatura y estabilizar así el funcionamiento del equipo.

La importancia de estas cuestiones no hace sino aumentar debido a la proliferación de equipos de red y el consecuente aumento en el consumo de energía. También han adquirido importancia desde el punto de vista social, por lo que se refiere a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estas cuestiones adquirirán aún más importancia en el futuro. Por consiguiente, en la presente Recomendación se estudian las posibles tecnologías y su funcionamiento coordinado que podrán contribuir a ahorrar energía y a alcanzar otros objetivos.

La contribución de las TIC a la reducción del efecto negativo sobre el medio ambiente se suele denominar "ecología mediante las TIC" y "TIC ecológicas". Por "ecología mediante las TIC" se refiere a reducir el impacto ambiental de los otros sectores utilizando las TIC, mientras que por "TIC ecológicas" se entiende la reducción del impacto ambiental causado por las TIC propiamente dichas, por ejemplo la reducción del consumo eléctrico de los computadores personales (PC), servidores y encaminadores. Por consiguiente, la contribución de las redes futuras a la reducción del impacto ambiental puede clasificarse del modo siguiente:

- Ecología mediante las redes futuras

Consiste en reducir el impacto ambiental de otros sectores distintos del de las TIC utilizando las redes futuras.

Las redes futuras deben ser una herramienta útil para reducir el impacto ambiental de otros sectores. Como ejemplos de cómo interpretar el concepto de "ecología mediante las redes futuras" cabe citar la arquitectura de las redes inteligentes para la distribución de energía eléctrica o las redes de sensores ubicuos para supervisar el cambio climático de la Tierra.

- Redes futuras ecológicas

Consiste en reducir el impacto ambiental de las redes futuras.

El principio fundamental de las redes futuras es que su impacto ambiental debe ser mínimo. Como se ha mencionado más arriba, la utilización de redes puede servir para reducir el impacto ambiental de otros sectores. Ahora bien, al proceder así se incrementa el volumen de tráfico que circula por las redes y, por ende, su consumo de energía, lo que a su vez aumenta el impacto ambiental. La reducción del consumo de energía de los dispositivos de red, como encaminadores, conmutadores y servidores es un ejemplo claro de la contribución de las "redes futuras ecológicas".

Si bien los dos aspectos son importantes, la presente Recomendación se concentra en las "redes futuras ecológicas", es decir, en el ahorro de energía en las redes propiamente dichas, dado que el

consumo energético de éstas aumenta rápidamente con el aumento del número de aplicaciones en las redes.

6.2 Etapas de la vida útil y niveles que se han de considerar

A fin de reducir el consumo de energía, es importante analizar dicho consumo en cada etapa de la vida útil. Para analizar la vida útil se suelen utilizar las siguientes etapas (por ejemplo en [ITU-T L.1400]):

- producción (preparación de materia prima y componentes para el producto);
- fabricación;
- utilización;
- eliminación/reciclaje.

En el caso de redes, la primera etapa (producción) consiste en la preparación de materia prima para pequeños dispositivos electrónicos y la composición del equipo que lo integra. La segunda etapa (fabricación) consiste en construir la red mediante el equipo, para lo cual se han de transportar las piezas del equipo desde el almacén del fabricante hasta el lugar de construcción. La tercera etapa (utilización) se refiere a la explotación del equipo. Al final de su vida útil, la red y todos sus equipos se eliminan o reciclan en lo que constituye la cuarta etapa (eliminación/reciclaje). Al gestionar la vida útil se toman en consideración todas estas etapas. Ahora bien, en el caso de las redes la tercera etapa, la etapa "utilización", se considera la más importante, por cuanto es precisamente en esta etapa que resulta problemático el consumo de energía de los equipos de red, que están siempre encendidos, consumo que puede controlarse mediante la arquitectura de red, las capacidades y las operaciones.

El ahorro energético en la red se basa en diversas tecnologías, dado que resulta poco realista basarse en una sola tecnología. En la fase de utilización se pueden distinguir tres niveles con sus respectivas tecnologías, a saber, nivel de dispositivo, de equipo y de red.

- Nivel de dispositivo
Tecnologías que se aplican a los dispositivos electrónicos, como dispositivos de gran densidad de integración (LSI) y memorias.
- Nivel de equipos
Tecnología que se aplican a un determinado equipo (o conjunto de dispositivos), como un encaminador o conmutador.
- Nivel de red
Tecnologías que se aplican al equipo dentro de la red en general (por ejemplo, un protocolo de encaminamiento que se aplica a varios encaminadores).

Las tecnologías que pertenecen a cada nivel y su combinación evolucionarán y cambiarán con el transcurso del tiempo. Las redes futuras deben integrar estas tecnologías de manera flexible para poder adaptarse a la evolución y a los cambios que permitan mejorar el ahorro energético.

7 Análisis de las tecnologías de ahorro de energía

7.1 Lista de tecnologías y sus niveles

A partir de los tres niveles descritos en la cláusula 6, las posibles tecnologías se pueden clasificar del modo siguiente:

- Tecnología a nivel de dispositivo
Microfabricación LSI, unidad de procesamiento central con varios núcleos (CPU), desactivación del reloj (*clock gating*), memoria virtual con control de alimentación, amplificador de potencia avanzado (PA).

- Tecnología a nivel de equipo
Nodo de red óptico, control del modo reposo, ALR/DVS, diseño térmico, servidor de memoria cache, filtrado, servidores de "indisponibilidad", conformación, estaciones transceptoras de base compactas (BTS), tecnologías de antenas inteligentes, estaciones repetidoras.
- Tecnología a nivel de red
Conmutación de circuitos/ráfagas, ingeniería de encaminamiento/tráfico en función del consumo de energía, protocolos livianos, transmisión programada, red de entrega de contenido (CDN), aplazamiento en condiciones de tráfico intenso, diseño de células pequeñas, planificación de red en función del consumo energético.

En las cláusulas 7.2 a 7.4, se describe las tecnologías correspondientes a cada nivel, esto es de dispositivo, de equipo y de red. Esta clasificación puede variar en el futuro si se mejoran las tecnologías del caso.

7.2 Tecnologías a nivel de dispositivo

7.2.1 Microfabricación LSI

Para una misma calidad de funcionamiento y/o función, cuanto más delgado sea el proceso LSI, menor será el tamaño del LSI. Dado que la microfabricación LSI permite reducir la tensión de alimentación y, por ende, disminuir el consumo de energía, que es proporcional al cuadrado de dicha tensión. Hasta ahora se han logrado ir reduciendo la tensión a un ritmo del 30% anual, pero este ritmo ha decaído recientemente debido al aumento de la corriente de fuga. Algunos fabricantes de LSI están aplicando varios métodos para compensar esta desaceleración con el fin de aumentar ese porcentaje de mejora.

7.2.2 CPU de varios núcleos

Esta tecnología consiste en integrar varios núcleos de CPU en un solo procesador. Dada una tarea determinada, se ahorra más energía utilizando varias CPU sencillas que una sola CPU compleja debido a las características físicas de los dispositivos electrónicos. Es decir, el consumo de energía es generalmente proporcional al cubo de la frecuencia del reloj, lo que significa que utilizar varias CPU presenta más ventajas en cuanto al consumo de energía se refiere. Además, si se requiere una calidad de funcionamiento tan elevada que no puede lograrse con una sola CPU, no hay más opción que utilizar varias.

Por otra parte, las CPU de varios núcleos pueden funcionar junto con tecnologías de control dinámico, como la desactivación del reloj (véase la cláusula 7.2.3) y control del modo en reposo (véase la cláusula 7.3.2). Estas tecnologías permiten controlar la fuente de alimentación y la velocidad del reloj de múltiples CPU de varios núcleos, de modo que sólo funcione el menor número necesario de CPU a la velocidad de reloj mínima. Si estos dos parámetros de la CPU, esto es, el número de CPU activas y su velocidad de reloj, se controlan adecuadamente en función de la carga, se puede ahorrar energía.

7.2.3 Desactivación del reloj (*clock gating*)

Esta tecnología consiste en desactivar la señal del reloj de ciertos LSI y circuitos cuando no hay tareas que desempeñar. Cuanto más tiempo se esté sin suministrar la señal del reloj explícitamente, más energía se ahorra. El problema es que cuando la transición entre los estados ON y OFF de la señal del reloj se produce con frecuencia, menos energía se ahorra debido a la energía adicional necesaria para esa transición.

7.2.4 Memoria virtual con control de alimentación

Esta tecnología permite ahorrar energía controlando la parte activa de la memoria en función de la demanda y utilización reales [b-Huang]. Desde el punto de vista del ahorro energético, esta tecnología se aplica a la memoria búfer y a la memoria caché en los nodos de red.

7.2.5 Amplificador de potencia avanzado (PA)

Se trata del amplificador de potencia que alimenta a las estaciones de base en las redes inalámbricas y que su elevada eficiencia es muy difícil de conseguir con las actuales tecnologías comerciales. Como el amplificador de potencia representa el mayor porcentaje del consumo total de energía de las estaciones de base de redes inalámbricas, la utilización de amplificadores de potencia muy eficientes puede reducir el consumo energético [b-ATIS]. El amplificador de potencia avanzado debe tener en cuenta la aplicación del circuito, la selección de componentes y la innovación de procesos. Ejemplos de esta tecnología son la predistorsión digital (DPD) y el transistor bipolar de heterounión de alta tensión (HVHBT). Cuando aparece distorsión en el amplificador de potencia, el DPD introduce distorsión en la dirección opuesta a la del amplificador de potencia, anulando así la distorsión. El HVHBT es un chip avanzado que sirve para mejorar la eficiencia.

7.3 Tecnologías a nivel de equipo

7.3.1 Nodo de red óptico

Esta tecnología tiene por objeto introducir tecnologías ópticas eficientes por lo que al consumo energético se refiere en las interfaces de transmisión y/o la estructura de conmutación de los nodos de red. La capacidad de los nodos de red ópticos es mucho mayor que la de los nodos electrónicos, con velocidades del orden de Tbps e incluso mayores. Esta tecnología puede mejorar drásticamente la eficiencia energética [b-Klein], gracias al gran volumen de tráfico combinado en el nodo o fuera de él. El problema es que, si el flujo de tráfico es escaso, no se puede lograr suficiente eficiencia energética.

La conmutación de paquetes totalmente óptica puede mejorar la eficiencia energética ya que no es preciso realizar la conversión de óptico a eléctrico ni viceversa en el nodo de red, conversión que suele consumir mucha energía. Sin embargo, su aplicación a gran escala sigue siendo difícil en la práctica, debido sobre todo a la dificultad de memorizar la señal óptica.

7.3.2 Control del modo en reposo

Esta tecnología permite que los equipos y funciones entren en el "modo en reposo" cuando no se están utilizando, ahorrando así energía. En los equipos, por ejemplo encaminadores y conmutadores en redes alámbricas y estaciones de base radioeléctricas y dispositivos móviles en redes inalámbricas, el control del modo reposo suele integrarse en las interfaces del equipo y de la red. Así, el ahorro de energía depende de la dinámica del tráfico. Cuanto mayor sea la diferencia entre el tráfico máximo y mínimo, más energía puede ahorrarse. La explicación es la siguiente: el consumo de energía en los equipos sin control del modo reposo se mantiene prácticamente constante y dependen del tráfico máximo que han de soportar. Al recurrir al control del modo reposo, si el tráfico que circula por trayectos paralelos en un determinado periodo es menor que el máximo, algunos flujos pueden combinarse dinámicamente en un solo trayecto y los equipos que no se encuentran en dicho trayecto pueden pasar al modo reposo. La reducción del consumo de energía depende por tanto del tráfico mínimo.

En las redes alámbricas, el impedimento de utilizar esta tecnología es el reducido y rutinario tráfico de control (por ejemplo, información de encaminamiento) que resulta imprescindible aun cuando no circule tráfico de datos. El método para tramitar dicho tráfico de control constituye un problema. Una solución sería recurrir a un "intermediario" que mantenga una presencia de red durante el modo reposo para cualquier nodo de red y que sea éste el que responda al tráfico de red rutinario en lugar del nodo de red. Esta tecnología se describe detalladamente en la especificación ENERGY STAR,

versión 5.0 [b-ESTAR1]. Un ejemplo del control del modo reposo es el protocolo Ethernet con eficiencia energética preparado por el *Energy Efficient Ethernet Task Force* [b-IEEE P802.3az]. Otro ejemplo es el modo de ahorro de energía L2 (por ejemplo, modo de potencia reducida) combinado con las actuales tecnologías ADSL2 y ADSL2plus.

Por otra parte, en las redes inalámbricas, el software de control del modo reposo se integra en las estaciones de base radioeléctricas con funciones de ahorro energético y en los dispositivos móviles. En las estaciones de base radioeléctricas el software de control del modo reposo desactiva (apaga) las bandas con poco tráfico en dicha célula, o bien toda la estación de base. Los dispositivos móviles en modo reposo cambian entre los estados en reposo y en escucha. Cuando se encuentra en el estado en reposo, los dispositivos móviles no se comunican con sus correspondientes estaciones de base al reducir la potencia de sus baterías. En el modo en escucha, estos dispositivos comprueban si han recibido un mensaje despertar procedente de la estación de base que le da servicio.

7.3.3 Velocidad de enlace adaptativa (ALR) y reducción dinámica de la tensión (DVS)

Se trata de un modo de ahorro de energía para los equipos de red. La ALR controla la velocidad del enlace (esto es, la velocidad binaria) de la interfaz en función del volumen de tráfico que se ha de cursar. La DVS controla la tensión o voltaje que alimenta a la CPU, al disco duro, la tarjeta de red (NIC), etc., en función del volumen de tráfico. El problema que presenta esta tecnología es cómo gestionar las ráfagas de tráfico (por ejemplo, el tiempo de respuesta y la eficiencia en caso de cambios frecuentes).

7.3.4 Diseño térmico

Dado que en los nodos de red el sistema de refrigeración consume bastante energía, se podría ahorrar energía mejorando el diseño térmico del nodo. Esta solución también puede aplicarse al caso de un centro de datos donde se hallan múltiples nodos.

7.3.5 Servidor de cache

Esta tecnología consiste en almacenar temporalmente el contenido para reducir la duplicación del tráfico y el tráfico no esencial cuando varios usuarios consumen el mismo contenido o un mismo usuario consume el mismo contenido en repetidas ocasiones. Esta tecnología presenta la ventaja de reducir el ancho de banda. Esta tecnología resulta eficaz cuando el servidor de cache almacena copia de contenido cuyo consumo es muy probable. El problema radica en que, si la probabilidad es baja, el servidor tiene que comprobar la disponibilidad del contenido y luego acceder con frecuencia al servidor original. Debido a los servidores y tareas adicionales, es posible que se consuma más energía. Por consiguiente, para reducir el consumo de energía es indispensable controlar el funcionamiento del servidor teniendo en cuenta su tasa de aciertos.

7.3.6 Filtrado

Esta tecnología consiste en bloquear la transmisión de datos no válidos o no esenciales, por ejemplo mensajes de mantenimiento de conexión o mensajes de usuario duplicados. Otro ejemplo de esta tecnología es el sistema anti-intrusión, también denominado sistema de detección o prevención de intrusiones. Esta tecnología impide/bloquea activamente intrusiones tales como los ataques distribuidos de denegación del servicio (DDoS) mediante la supervisión del tráfico de red y/o las actividades malignas. Al reducir el tráfico disminuye también el correspondiente consumo de energía que éste requería.

7.3.7 Servidor de indisponibilidad

Este servidor muestra una respuesta alternativa o una "disculpa" para informar de que el servicio solicitado no está disponible debido a una congestión temporal de tráfico. Así, algunos usuarios aplazarán para más tarde o abandonarán el tráfico solicitado, reduciéndose así el tráfico máximo y, por ende, el consumo de energía.

Además, se pueden indicar algunas medidas que debe tomar la entidad que recibe el mensaje. Por ejemplo, se puede pedir que no vuelva a solicitar el tráfico hasta tanto no haya transcurrido cierto tiempo.

7.3.8 Conformación

Esta tecnología consiste en controlar la velocidad de salida de paquetes para que sea inferior a la velocidad del posible enlace. Al controlar y reducir la velocidad máxima de datos, permite ahorrar energía en los nodos ulteriores, que funcionarán con arreglo a dicha velocidad. El principal inconveniente de esta tecnología es que puede aumentar el retardo debido a la cola de espera.

7.3.9 Estaciones transeptoras de base (BTS) compactas

Este tipo de estación de base se ha concebido para ahorrar el consumo de energía y reducir costes. A diferencia de las actuales BTS en tierra y las BTS distribuidas, las BTS compactas no necesitan protección ni equipo de refrigeración, por lo que consumen menos energía, son más económicas y sus gastos de instalación son menores. Además, disponen de funciones muy avanzadas, tales como varias antenas por sector con entradas y salidas múltiples (MIMO), así como conformación del haz [b-Fili].

7.3.10 Tecnologías de antenas inteligentes

Las tecnologías de antenas inteligentes, como MIMO, son algoritmos de procesamiento inteligente de señales que utilizan sistemas con múltiples antenas en el receptor y el transmisor que mejoran la calidad de funcionamiento de la comunicación inalámbrica. Como son capaces de controlar la dirección de recepción y transmisión de señales y reducir así la interferencia con otras señales, permiten utilizar velocidades de datos más elevadas que las de los sistemas de una entrada y una salida (SISO), con los mismos requisitos en cuanto al balance de potencia de transmisión y la tasa de errores en los bits. Por ejemplo, las tecnologías de transmisión cooperativa, en la que varias estaciones de base cooperan entre sí y transmiten uno o varios flujos MIMO hacia el terminal utilizando la misma banda de frecuencia, pueden aumentar la eficiencia espectral gracias a la mayor relación entre la señal y la interferencia y el ruido (SINR). En particular, los sistemas de antena distribuidos pueden aumentar la cobertura de red disponible en las proximidades o en las zonas de cobertura celular solapada. Estas tecnologías de antenas inteligentes pueden ahorrar energía en las redes inalámbricas [b-ATIS][b-Cui].

7.3.11 Estación repetidora

Una estación repetidora es un transmisor que retransmite o repite la señal de otra estación de base hacia una zona donde no llega la señal de la estación de origen. Las estaciones repetidoras en las redes inalámbricas aumentan la calidad de funcionamiento y ahorran potencialmente energía ya que se establecen más conexiones entre el nodo de origen y el de destino, de modo que los datos pueden suministrarse a través de varios enlaces inalámbricos gracias a los nodos repetidores. Así, cada enlace dispone de canales de desvanecimiento independientes, lo que permite mejorar la eficiencia espectral y la diversidad de ganancia. Por consiguiente, se reduce el tiempo necesario para transmitir un determinado volumen de datos y, por ende, el consumo de energía.

7.4 Tecnologías a nivel de red

7.4.1 Conmutación de circuitos y conmutación de ráfagas

En general, la conmutación de circuitos consume menos energía que la conmutación de paquetes ya que su mecanismo es sencillo y no requiere dispositivos de memoria que consumen energía, tales como SRAM y CAM, que se utilizan principalmente para el encaminamiento de paquetes. Se ha informado de que, incluso hoy en día, el encaminamiento de paquetes representa el 37% del total de energía que consumen los encaminadores [b-Baliga]. Esto significa que la conmutación de circuitos puede ahorrar energía, al no tener que realizar el encaminamiento de paquetes. La conmutación de

circuitos resulta especialmente eficiente en el caso de tráfico continuo, como secuenciación de vídeo, que cabe esperar que aumente radicalmente en el futuro. Sin embargo, esta tecnología presenta el inconveniente de que no puede efectuar la multiplexación estadística a nivel de paquetes, lo que degrada la utilización del enlace y, por tanto, la eficiencia energética de la red. Es sobradamente conocido que cada conexión en la conmutación de circuitos ocupa una línea, de modo que aun cuando el flujo de tráfico de una conexión sea escaso, las demás conexiones no pueden utilizar los recursos restantes.

La conmutación de ráfagas también reduce el consumo de energía en los encaminadores troncales. Esta tecnología consiste en agrupar paquetes en ráfagas de datos en los encaminadores limítrofes, reduciendo así las operaciones necesarias en dichos encaminadores para calcular el encabezamiento de cada paquete [b-Kim]. En las redes ópticas se utiliza una variante, a saber, la conmutación óptica de ráfagas. El objetivo es mejorar la utilización de la red mediante la multiplexación estadística. Esta tecnología permite, gracias al control de paquetes, utilizar el ancho de banda reservado para las ráfagas antes de la retransmisión. El ancho de banda se utiliza más eficientemente que en la conmutación óptica de circuitos, dado que el tiempo de establecimiento es considerablemente menor. Por otra parte, comparado con la red óptica de conmutación de paquetes, se reduce el número de operaciones de procesamiento y el consumo de energía en el núcleo de red [b-Peng]. El problema que presenta esta tecnología es que el mecanismo de agrupación en ráfagas afecta a la calidad de funcionamiento de la red.

7.4.2 Ingeniería de tráfico y encaminamiento basados en el consumo de energía

Esta es una tecnología de ingeniería de encaminamiento/tráfico que consiste en controlar la ruta del tráfico con el fin de minimizar el consumo de energía global en la red. Esta tecnología puede incluir cierto procesamiento del tráfico, como la agregación, el encaminamiento por trayectos múltiples y la codificación de red. La tecnología cuenta con que los nodos de red disponen de las funciones de control del modo reposo o ALR/DVS descritas en la cláusula 7.3. Cuando se dispone de la función modo reposo, esta tecnología combina el tráfico y dirige hacia un conjunto limitado de recursos, de manera que los nodos o enlaces no utilizados entran en el modo reposo y no se consume energía innecesariamente. Cuando la función ALR/DVS está disponible, esta tecnología distribuye el tráfico en múltiples rutas, de modo que cada nodo cursa el mínimo tráfico, con una velocidad de enlace o tensión adecuada para no consumir energía innecesariamente. El problema que plantea esta tecnología es la gestión de la dinámica del tráfico.

Cuando se dispone de la función de codificación de red, esta tecnología reduce el volumen de paquetes transmitidos codificando los paquetes en un paquete en los nodos de red intermediarios. Por consiguiente, ahorrando así energía [b-Nagajothy]. Esta tecnología es crucial en las redes de sensores inalámbricas.

7.4.3 Protocolo liviano

Esta tecnología examina la utilización del protocolo junto con protocolos de otras capas y optimiza su utilización para que el procesamiento total de los protocolos en la red sea liviano. Comprende un procedimiento de simplificación del protocolo de red del caso. Por lo general, consiste en dos métodos. El primero es transferir el tráfico de datos por las capas inferiores, que generalmente son más simples y livianas. Se puede aplicar a un ámbito determinado, como al núcleo de red. El segundo método consiste en simplificar el protocolo o bien su utilización. El primer caso comprende la conmutación por etiquetas, por ejemplo la conmutación por etiquetas multiprotocolo (MPLS), que se efectúa por debajo de la capa IP. El segundo caso comprende la convergencia mediante la ampliación de la capacidad IP desde la red de acceso a su red de conexión (backhaul) para utilizar como plataforma común una conexión en red totalmente IP [b-ATIS], un TCP modificado con un algoritmo de retransmisión mejorado, y el protocolo de control y configuración de puntos de acceso inalámbricos (CAPWAP) que reduce el encabezamiento de señalización en la

red de área local inalámbrica (WLAN) [b-IETF CAPWAP]. Esta tecnología permite eliminar funciones innecesarias en los nodos de red, ahorrando así energía.

7.4.4 Transmisión programada

Esta tecnología tiene por objeto reducir el tamaño de las memorias búfer que es necesario controlar o realizar en los nodos de red. Se controla el volumen y la temporización de la transmisión de paquetes con el fin de minimizar el tiempo de espera a la salida de cada nodo, reduciendo así el número de memorias búfer y, por tanto, el consumo de energía. El problema de esta tecnología es que la tasa de pérdida de paquetes se deteriora si el control no tiene la capacidad de memoria búfer diseñada. Si se produce un fallo en la programación, llegarán al nodo más paquetes de los que es capaz de almacenar la memoria búfer diseñada. Por consiguiente, para evitar esta pérdida de paquetes es posible que la transmisión programada requiera recursos de red adicionales fuera del nodo destinatario. La diferencia de esta tecnología con la conformación (cláusula 7.3.8) es que esta última funciona de manera autónoma en el nodo para reducir el volumen máximo tráfico que circula por el mismo, mientras que en la transmisión programada cooperan varios nodos para controlar la temporización de la transmisión de paquetes en cada nodo y evitar que la red se congestione.

7.4.5 Red de entrega de contenido (CDN)

Se trata de una red optimizada y diseñada especialmente para la entrega de contenido. La CDN optimizada puede ahorrar energía porque puede acceder a un servidor que está más próximo que el previsto originalmente, por lo que se ahorran recursos de ancho de banda y distancia y, por ende, energía [b-Klein]. El problema de esta tecnología es el mismo que el del servidor de cache, a saber, si la tasa de aciertos es pequeña, la tecnología pierde eficacia.

7.4.6 Aplazamiento en condiciones de tráfico intenso

Esta tecnología aplaza la transmisión lo más posible en situaciones de tráfico intenso. De esta forma disminuye el tráfico máximo que se ha de transmitir en un momento dado, lo que se traduce en una reducción del consumo total de energía, ya que ésta depende del tráfico máximo. Un método específico es distribuir de antemano el contenido popular a grandes servidores durante las horas de menor tráfico.

7.4.7 Diseño con células pequeñas

Esta tecnología consiste en emplear células más pequeñas (microcélulas, picocélulas y femtocélulas) en lugares donde la demanda de servicios móviles es elevada, como en centros urbanos, centros comerciales, aeropuertos, campus y edificios de oficinas con el fin de disminuir el tráfico en las macrocélulas. Es obvio que las células pequeñas necesitan menos energía para transmitir que las macrocélulas, ya que la pérdida de energía en un canal inalámbrico es proporcional a la distancia de propagación d^α , siendo α el exponente de pérdidas en el trayecto, por lo que se puede ahorrar energía al transmitir la señal radioeléctrica. Sin embargo, si se tiene en cuenta la potencia, la energía del circuito y la energía de refrigeración del sitio, así como la potencia de transmisión, el diseño con células pequeñas no siempre es eficiente desde el punto de vista energético [b-Chen-a], de modo que lo más eficiente es combinar macrocélulas y microcélulas y efectuar una medición realista del consumo de potencia para la planificación óptima de células. Además, las tecnologías de diseño con células pequeñas se suelen materializar en estaciones BTS compactas, descritas en la cláusula 7.3.9 junto con macroestaciones BTS, construyendo así redes celulares superpuestas [b-SCELL][b-INST].

Por otra parte, el diseño con células pequeñas tiene la ventaja de que la estación de base puede adaptarse a su entorno con mayor precisión y más dinámicamente que cuando se emplean células más grandes. Para realizar el ajuste, el diseño con células pequeñas puede recurrir a algoritmos de eficiencia energética, como conmutación sensible a la cobertura, que permite a la estación de base detectar la cobertura espacial existente de otras estaciones y dejar de funcionar, así como el modo en reposo en función del tráfico que detecta la actividad de los equipos de usuario mediante el

sondeo de la portadora y apaga temporalmente las células pequeñas inactivas [b-Claussen]. Un ejemplo son las femtocélulas, que son estaciones de base domésticas pequeñas, económicas y de baja potencia. Gracias a la pequeña distancia, las femtocélulas ofrecen mejor cobertura de voz y datos en interiores, funcionan con una potencia de transmisión muy reducida, prolongan la duración de la batería del dispositivo móvil y generan una relación alta de señal a interferencia [b-Badic]. La reducción del consumo de energía se explica con mayor detalle en [b-Grant].

7.4.8 Planificación de la red teniendo en cuenta el consumo de energía

Esta tecnología se concentra en el diseño y planificación de toda la red, ya sea alámbrica o inalámbrica. Hasta ahora en la planificación de red se tomaba en consideración la calidad de funcionamiento y la fiabilidad, sin prestar mucha atención a la eficiencia energética ni a la reducción del impacto ambiental. Ahora bien, al planificar la red se han de tener en cuenta estos aspectos. A tal efecto, se debería recabar diversos tipos de información, tales como el consumo de energía, así como información tradicional, como la relativa a los apagones de red (por ejemplo, el número de pérdidas y la duración del apagón).

La planificación de la red teniendo en cuenta el consumo de energía consta de dos partes, una estática y otra dinámica. La parte estática se refiere a la fase previa a la puesta en funcionamiento (diseño de la red). Consiste en construir la red física y establecer una política de encaminamiento para minimizar el consumo de energía, con la condición de que tenga capacidad para el volumen máximo de tráfico estimado previamente. Por otra lado, la parte dinámica se refiere a la fase de explotación. Consiste en reencaminar el flujo de tráfico existente o cursar nuevo flujo de tráfico adicional con el fin de minimiza el consumo total de energía, con la condición de que tenga capacidad para el tráfico existente medido y el nuevo tráfico solicitado. Las dos partes son importantes para ahorrar la energía que se consume en una red. Según [b-Chabarek], la planificación de la red teniendo en cuenta el consumo de energía puede traducirse en un ahorro considerable de energía. Uno de los ejemplos de planificación dinámica de red en las redes alámbricas es el *zoom* de células, que ajusta adaptativamente el tamaño de las células en función de la fluctuación de la carga de tráfico y de las necesidades del usuario. Ese ajuste puede utilizarse para equilibrar la carga transfiriendo carga de una célula muy cargada a otra de menor carga, pero también para ahorrar energía haciendo un zoom en la célula a cero cuando la carga de tráfico es lo suficientemente pequeña [b-Zhisheng].

8 Consideraciones relativas al ahorro de energía

En primer lugar, en la cláusula 8.1 se describen los ámbitos que se toman en consideración para el ahorro de energía. Seguidamente y con arreglo a estas condiciones previas, se formulan algunas consideraciones acerca de las medidas que se han de tomar para ahorrar energía en función de las características inherentes de las tecnologías enumeradas en las cláusulas anteriores.

8.1 Ámbito objeto de la presente Recomendación

- "Redes futuras ecológicas" o "Ecología mediante las redes futuras"

La presente Recomendación se concentra en las "redes futuras ecológicas" (cláusula 6.1).

- Etapas de la vida útil

La presente Recomendación se concentra en la etapa de utilización (cláusula 6.2).

Esta etapa comprende la fase previa a la puesta en marcha y la fase de explotación. En la fase previa a la puesta en marcha se examina el problema estático de cómo minimizar los recursos de red preparados para atender una determinada demanda de tráfico al diseñar la red. La fase de explotación considera el problema dinámico de cómo utilizar menos recursos de red en función del tráfico en cada momento durante la explotación de la red.

- Niveles de tecnología
En la presente Recomendación se consideran tres niveles de tecnología (nivel de dispositivo, de equipo y de red).
Cada tecnología no funciona de manera autónoma, sino que coopera con las demás a diferentes niveles. El objetivo es encontrar una solución global que incorpore cada nivel de las tecnologías.
- Métodos de ahorro de energía
La presente Recomendación se concentra en los métodos técnicos.
Existen diversos métodos, cada uno con planteamientos diferentes. Algunos son técnicos y otros no. Un ejemplo típico de métodos no técnicos es la reglamentación, en la que se asigna por ley tiempo de utilización de las redes a cada grupo de usuarios predefinido. Son importantes tanto los métodos técnicos como los no técnicos, aunque la presente Recomendación se concentra en los técnicos.

8.2 Formas de ahorrar energía

Las formas de ahorrar energía se derivan de las características inherentes de las tecnologías enumeradas en las cláusulas anteriores. Estas formas de ahorro, que se describen en las cláusulas 8.2.1 y 8.2.2, servirán de ayuda al considerar la adecuada combinación de tecnologías para obtener mejores resultados.

- Reducción de la capacidad de red necesaria (cláusula 8.2.1)
 - Reducir el volumen de tráfico en toda la red (cláusula 8.2.1.1).
 - Aplazar el tráfico en horas punta, reduciendo así la capacidad máxima (cláusula 8.2.1.2).
- Aumento de la eficiencia energética de la red (cláusula 8.2.2)
 - Controlar el dispositivo y/o el equipo en función de la dinámica del tráfico (cláusula 8.2.2.1).
 - Transmitir el tráfico a menor potencia (cláusula 8.2.2.2).

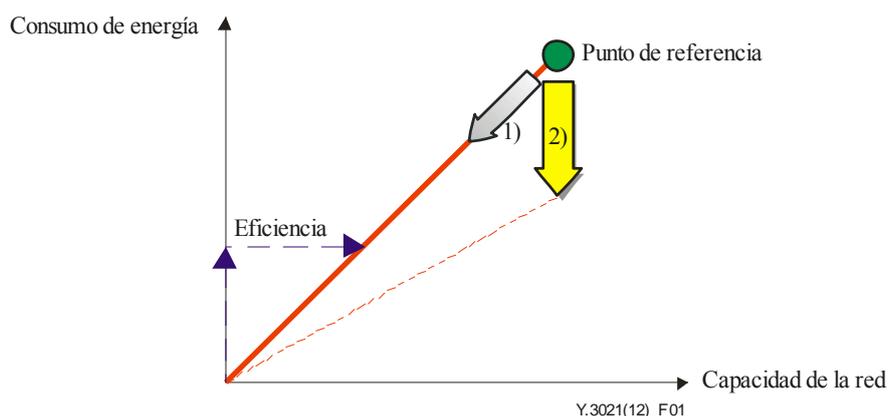


Figura 1 – Consumo de energía en función la capacidad de red

8.2.1 Reducción de la capacidad de red necesaria

Este método se basa en el volumen de tráfico. Cuando se reduce el tráfico, se necesitan menos recursos y capacidad de red y, por consiguiente disminuye el consumo de energía. Este efecto se muestra en la Figura 1, como una forma de aproximarse al origen.

8.2.1.1 Reducción del volumen de tráfico en toda la red

Se trata de un método estático destinado a reducir el volumen de tráfico que transmiten los dispositivos o equipos. Un ejemplo consiste en habilitar una memoria intermedia a la entrada de la red (más próxima al usuario) a fin de reducir la utilización del recurso de red correspondiente para el contenido de frecuente acceso.

8.2.1.2 Aplazamiento del tráfico en horas punta

Al aplazar el tráfico en horas punta se reduce la capacidad máxima. Se trata de un método dinámico. Una parte del consumo energético de los dispositivos y equipos depende de la cantidad máxima de tráfico que puede manejarse. Por consiguiente, si se logra reducir el tráfico máximo, se reduce igualmente el consumo energético. Como ejemplo cabe citar la planificación de tareas, que consiste en enviar el contenido más popular a servidores intermedios próximos a los usuarios antes de las horas punta.

8.2.2 Aumento de la eficiencia energética de la red

Este método se centra en la eficiencia energética de la red, suponiendo que la capacidad de red requerida permanece constante. El efecto se muestra en la Figura 1 como una forma de reducir el consumo de energía. Este método requiere consideraciones arquitectónicas a varios niveles. La eficiencia energética de la red se puede definir normalmente mediante el caudal de la red dividido entre la energía consumida, es decir, bits por segundo/vatios, y se expresa para una capacidad de red que es equivalente al caudal máximo. Así, si la eficiencia energética de la red se pudiera mejorar de alguna manera –por ejemplo gracias a la evolución de dispositivos, como microfabricación LSI basada en la Ley de Moore– el consumo total de energía se reduciría de acuerdo con esta evolución.

8.2.2.1 Control del dispositivo y/o del equipo en función de la dinámica del tráfico

Se trata de un método dinámico. Los dispositivos de red actuales suelen funcionar a plena capacidad y a plena velocidad con independencia de las fluctuaciones de tráfico. Este método consiste en controlar el funcionamiento de los dispositivos y equipos en función de la fluctuación del tráfico. Un ejemplo es el control del modo en reposo.

8.2.2.2 Retransmisión de tráfico a menor potencia

Este es un método estático. Actualmente la retransmisión de datos se suele efectuar con arreglo a protocolos por capas bastante complejos. Este método consiste en transmitir datos mediante un mecanismo simplificado utilizando las capas inferiores, protocolos ligeros, etc. Un ejemplo sería el de una red óptica con menos intervención eléctrica.

Un problema que exige una atención especial es el objetivo (servicio, equipo, etc.) y el periodo de medición de la calidad de funcionamiento energético de la red. Como se describe en la cláusula 3.2.2 *supra*, la eficiencia se define como el caudal de datos transmitidos por la red dividido entre la energía consumida (normalmente, bps/w). El problema es que el caudal (bps) está estrechamente relacionado con la naturaleza de los servicios y varía con el tiempo, dando lugar a distintos valores de la relación bps/vatio. Por este motivo es necesario seleccionar correctamente el objetivo y el periodo de medición de la eficacia en función de las propiedades del servicio, del usuario (por ejemplo, de extremo a extremo o en una subred particular), etc.

En las cláusulas 8.3 y 8.4 se analizan con mayor detalle los métodos descritos en las cláusulas 8.2.1 y 8.2.2, y se indican prácticas útiles de las diferentes tecnologías.

8.3 Control del dispositivo y/o equipo en función de la dinámica del tráfico

Entre las tecnologías que tratan de la dinámica del tráfico cabe citar el control del modo en reposo y el ajuste dinámico de la tensión (DVS). El control del modo en reposo ahorra energía desactivando el dispositivo cuando no se utiliza, mientras que el DVS funciona reduciendo la capacidad de retransmisión de tráfico de dispositivos tales como las CPU, tarjetas de línea y tarjetas de interfaz

de red (NIC) cuando el volumen de tráfico es reducido. Estas tecnologías pueden ahorrar aún más energía cuando las redes tienen muchos nodos en modo reposo o se ha reducido la tensión aplicada. Por este motivo, el control del modo en reposo y el DVS son eficaces cuando se aplican a redes que suelen tener un gran número de dispositivos – por ejemplo, para una gran cobertura, elevada demanda máxima de tráfico, pero bajo volumen medio de tráfico y, por consiguiente bajo índice de explotación de los dispositivos. Una de las dificultades del control del modo en reposo es, como se indica en la cláusula 7.3.1, cómo tramitar tráfico de control reducido, como la información de encaminamiento. Una posibilidad es disponer de un "intermedio". Por otra parte, uno de los problemas que presenta el DVS es, como se indica en la cláusula 7.3.2, cómo tratar el tráfico a ráfagas.

Desde el punto de vista de la dinámica del tráfico, el tráfico Internet se caracteriza por la variación dinámica temporal y espacial. El consumo energético de los encaminadores es prácticamente independiente del volumen instantáneo del tráfico transmitido. Por consiguiente, la activación del modo en reposo cuando no circula tráfico por dichos encaminadores constituye una posible forma de ahorrar energía. No obstante, en la actualidad el tráfico se distribuye para su retransmisión en una red con arreglo a los trayectos predefinidos por los protocolos de encaminamiento o por otros métodos, lo que significa que el tráfico pasa por cada encaminador aunque su volumen global sea pequeño, lo que implica que cada encaminador debe mantenerse en funcionamiento todo el tiempo. Así, el problema radica en cómo controlar los trayectos del tráfico en toda la red de modo que los encaminadores pueden entrar en el modo en reposo.

8.4 Retransmisión de tráfico con menor potencia

Entre las tecnologías destinadas a reducir el consumo energético cabe citar la utilización de la microfabricación LSI y los nodos de red ópticos. La utilización de la microfabricación LSI reduce la tensión de alimentación y ofrece posibilidades de ahorro energético. La utilización de nodos de red ópticos aumenta considerablemente la capacidad de transporte y mejora radicalmente la eficiencia energética de la red, aunque exige que se agregue el tráfico para poder aprovechar al máximo la elevada capacidad potencial. Estas son tecnologías a nivel de dispositivo que se han creado específicamente para ahorrar energía. En cambio, todavía no se han identificado tecnología a nivel de equipo y red a tal efecto, aunque ofrecen posibilidades de ahorrar energía en el futuro.

Desde el punto de vista de la tecnología de retransmisión, las redes IP, como Internet, utilizan la conmutación de paquetes, que permite ofrecer eficazmente múltiples aplicaciones gracias a la multiplexación estadística. Sin embargo, el aumento de la velocidad y capacidad de las líneas de transmisión en el futuro exigirá tipos de memoria especiales de mayor rendimiento, es decir más velocidad y gran capacidad y que, por ende, consumirán más energía (como las memoria estáticas de acceso aleatorio (SRAM) y las memorias de contenido direccionable (CAM) para almacenamiento intermedio y encaminamiento. Ahora bien, el tráfico de vídeo, que previsiblemente aumentará en el futuro, se caracteriza por la generación continua de información en un sentido, mientras que las sesiones asociadas al tráfico de vídeo no cambian y las decisiones de encaminamiento se toman solamente una vez por sesión. Esta característica puede eliminar la necesidad de utilizar memorias CAM, que fueron concebidas originalmente para el encaminamiento por paquetes y tráfico heterogéneo. Conseguir prescindir de estos dispositivos que consumen mucha energía constituye una gran oportunidad técnica de ahorrar energía. Es decir, el reto tecnológico consiste en crear un mecanismo de retransmisión que no requiera estos costosos tipos de memoria.

8.5 Clasificación de cada tecnología

En el Cuadro 1 se muestra la clasificación de cada tecnología en función de su nivel de aplicación y método empleado.

Cuadro 1 – Clasificación de las tecnologías

Nivel tecnológico	Reducción de la capacidad (cláusula 8.2.1)		Aumento de la eficiencia energética (cláusula 8.2.2)	
	Reducción del tráfico (cláusula 8.2.1.1)	Aplazamiento en horas punta (cláusula 8.2.1.2)	Control dinámico (cláusula 8.2.2.1)	Potencia reducida (cláusula 8.2.2.2)
Dispositivo			<ul style="list-style-type: none"> – CPU multinúcleo – Desactivación del reloj – Memoria virtual sensible al consumo energético 	<ul style="list-style-type: none"> – Fabricación LSI – Amplificador de potencia avanzado
Equipo	<ul style="list-style-type: none"> – Servidor de memoria caché – Filtrado 	<ul style="list-style-type: none"> – Servidor de indisponibilidad – Conformación 	<ul style="list-style-type: none"> – Control del modo en reposo – ALR/DVS 	<ul style="list-style-type: none"> – Nodo óptico – Diseño térmico – BTS compactas – Tecnologías de antenas inteligentes – Estación de retransmisión
Red	<ul style="list-style-type: none"> – CDN 	<ul style="list-style-type: none"> – Aplazamiento en horas punta 	<ul style="list-style-type: none"> – Ingeniería de encaminamiento/tráfico – Planificación (dinámica) de red teniendo en cuenta el consumo de energía 	<ul style="list-style-type: none"> – Conmutación de circuitos/ráfagas – Protocolo liviano – Planificación de la transmisión – Diseño con células pequeñas – Planificación (estática) de red teniendo en cuenta el consumo de energía

Aunque todas estas tecnologías de ahorro de energía son útiles y demuestran las posibilidades de ahorrar energía en las redes, existen grandes diferencias entre la dificultad de lograr este ahorro y la reducción del consumo de energía. Es necesario seguir estudiando este asunto para decidir qué tecnologías deberían ser obligatorias y cuáles facultativas para las futuras redes. En la presente Recomendación no se especifica ningún requisito obligatorio y se considera que la utilización de estas tecnologías es facultativa.

9 Posibles funciones y sus interacciones

9.1 Posibles funciones

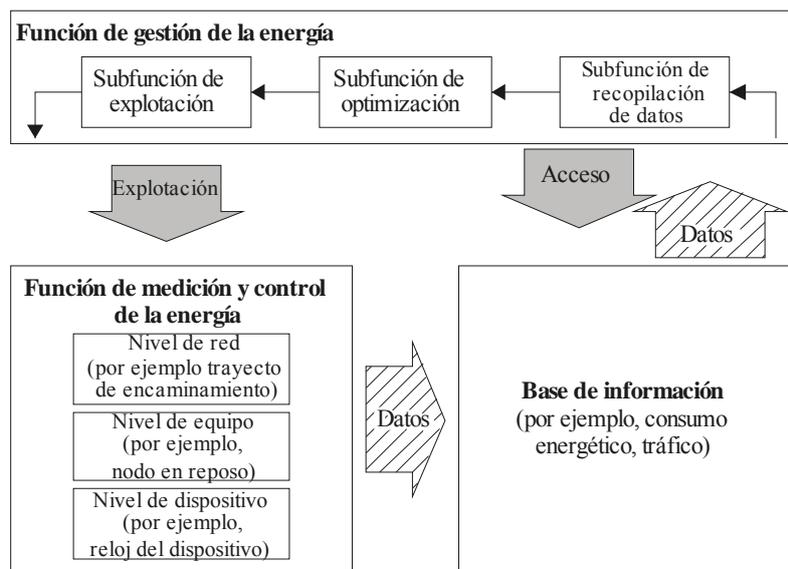
Según lo expuesto en la cláusula 8, "Consideraciones relativas al ahorro de energía", el ahorro energético en las redes puede ser de naturaleza estática y dinámica. El ahorro de energía de naturaleza estática en las redes consiste en cómo construir la red con dispositivos, equipos y tecnología de red de baja potencia, en la fase previa a la puesta en marcha (diseño de la red) y, a su vez, minimizar el consumo total de energía para el tráfico máximo previsto. El ahorro de naturaleza dinámica consiste en cómo adaptar el funcionamiento de los dispositivos, equipos y tecnologías de red a las variaciones del tráfico real en la fase de funcionamiento y minimizar el consumo total de energía con arreglo a esas dinámicas.

Para atender la naturaleza estática, el ahorro de energía consiste en emplear tecnologías de los tres niveles descritos al construir las redes que servirán de procesos de control de energía, mientras que para responder a la naturaleza dinámica, el ahorro de energía en general implica procesos de gestión, que recaban el estado actual, lo analizan y actúan en consecuencia para optimizar el

funcionamiento. Es posible identificar los procesos de gestión en cada nivel de tecnología: dispositivo, equipos y red. Los procesos de gestión pueden estar integrados en cada nodo de red o en un servidor de gestión de la red que supervisa cada equipo de la red. Evidentemente, es imprescindible la cooperación entre los diferentes niveles de gestión para el ahorro global de energía en la red. Además de los procesos de gestión, se necesita una base de datos que incluya la información necesaria para gestionar la energía.

A continuación se indican las posibles funciones que pueden aplicarse generalmente a cualquier tecnología de ahorro de energía. La Figura 2 muestra estas funciones, incluidas las bases de datos y sus interacciones.

- La función de control y medición de la energía ejecuta acciones de control para reducir el consumo energético, conforme a lo especificado por la función de gestión de la energía, y obtiene la información del estado medido. Se divide en tecnologías a nivel de dispositivo, de equipo y de red.
- La función de gestión de la energía recopila información básica, calcula el modo de funcionamiento óptimo y emite instrucciones a la función de control y medición de la energía. Comprende tres subfunciones: recopilación de datos, optimización y explotación.
- La base de información de estado recaba información básica sobre el modo actual de funcionamiento a partir de la función de medición y control de energía. Contiene información sobre aspectos tales como el consumo de energía y el tráfico.



Y.3021(12)_F02

Figura 2 – Posibles funciones

La Figura 2 es una representación lógica. La ubicación de estas funciones y bases de datos es totalmente independiente del equipo en concreto.

9.1.1 Función de control y medición de energía

La función de control y medición de energía consta de procesos de control y de medición.

Por lo que respecta a los procesos de control, la función de control y medición de energía comprende diferentes tecnologías de ahorro de energía, que se describen en la cláusula 7. Estas tecnologías se clasifican en los niveles de dispositivo, equipo y red. Ejemplos de cada nivel son la modificación del reloj del dispositivo, el nodo en reposo y la modificación del trayecto de encaminamiento, como se muestra en la Figura 2. Esta función está directamente relacionada con el consumo de energía y, por tanto, la gestiona la función de gestión de energía.

Por otra parte, en cada nivel hay tecnologías estáticas y dinámicas. La tecnología estática es en sí una tecnología autónoma para el ahorro de energía y no se ve afectada por parámetros externos, como la microfabricación LSI y el diseño térmico. La tecnología dinámica se controla mediante parámetros externos, como el nodo en reposo y el encaminamiento en función de la energía. El consumo de energía en las tecnologías estáticas queda definido en la fase previa a la puesta en marcha (diseño de red) de la red y es constante. En cambio el consumo de energía en las tecnologías dinámicas se controla y optimiza en la fase de funcionamiento. En el marco ilustrado en la Figura 2, la función de control y medición de energía se utiliza tanto en la fase estática como en la dinámica. En la fase estática (previa a la puesta en marcha), la función de control y medición de energía se construye utilizando tecnologías de los tres niveles sin interactuar con otras funciones. En la fase dinámica (funcionamiento), la función de control y medición de energía interactúa con otras funciones.

Por lo que hace a los procesos de medición, la función de control y gestión de energía comprende diversas tecnologías de medición de energía, que pueden estar relacionadas con las tecnologías de control de energía en cada capa. También se clasifican en tecnología a nivel de dispositivo, equipo y de red. Ejemplos de medición en cada nivel son la frecuencia, el periodo en modo reposo y la utilización del enlace.

Asimismo, si la función de gestión de energía exige modificar los parámetros y el método de medición, dicha función controlará la función de control y gestión de energía. Almacena la información de estado medida en la base de datos de estados. El método y los parámetros de medición varían según el tipo de tecnología de control de energía utilizada en el nodo o en la red.

9.1.2 Función de gestión de energía

La función de gestión de energía accede a la base de datos de estado y gestiona la función de control y gestión de energía con el fin de minimizar el consumo total de energía. Consta de las siguientes subfunciones:

Subfunción de recopilación de datos: recaba la información necesario sobre el estado de los nodos de red a partir de la base de datos de estado.

Subfunción de optimización: decide qué operación de gestión debe realizarse en cada nodo de red para minimizar el consumo total de energía.

Subfunción de operación: envía una solicitud de operación a la función de control y gestión de energía de los nodos de red.

9.1.3 Base de datos de estado

La base de datos de estado contiene un conjunto de información de estado que define las características de los nodos de red, tales como el consumo de energía y el tráfico.

9.2 Modelos de combinación de funciones

En la Figura 3 se muestran tres modelos de combinación de las diversas funciones identificadas por el marco anterior. Cuanto más abarque el modelo aplicado, mayores beneficios cabrá esperar de la optimización global y la combinación con la optimización local. Las líneas continuas muestran el flujo de señalización (operación/supervisión/acceso) y las líneas discontinuas el flujo de datos.

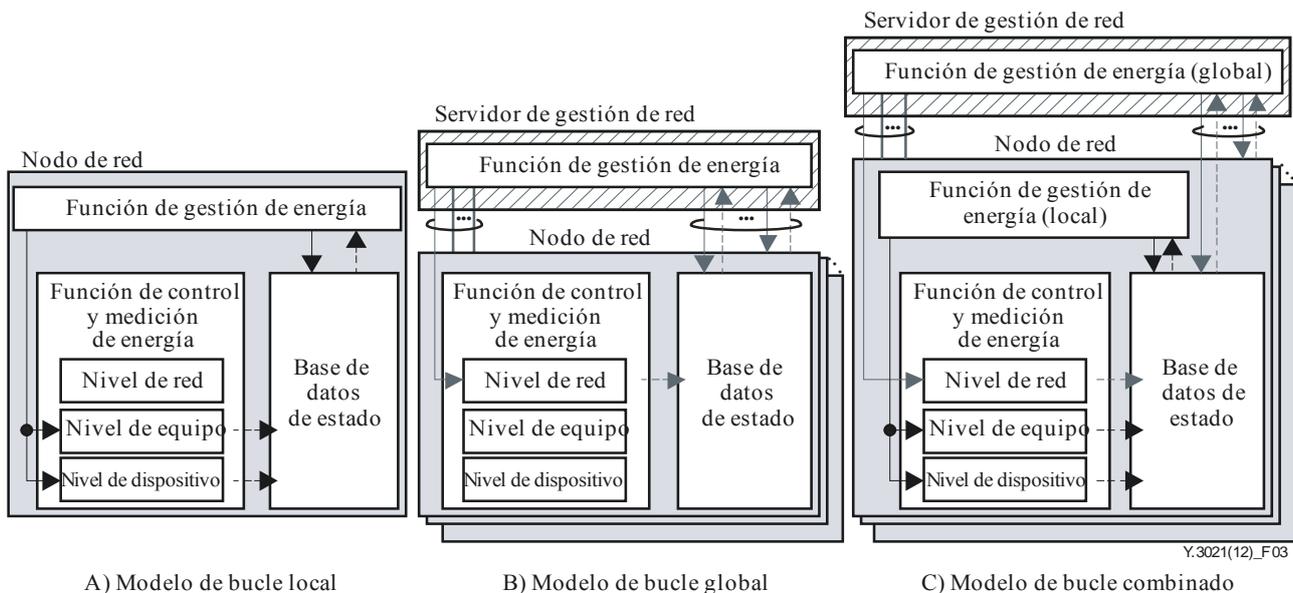


Figura 3 – Modelos de combinación de funciones de ahorro energético

A) Modelo de bucle local: Se suele implantar en un solo nodo de red, como un encaminador o conmutador. Cada nodo consta de dos funciones principales y una base de datos. El bucle de control local se cierra en el nodo. La función de gestión de energía emite instrucciones operativas a nivel de equipo y dispositivo de la función de control y gestión de energía, dado que estos niveles se ejecutan en cada nodo. Este bucle sirve para la autooptimización en cada nodo.

Un ejemplo característico de este modelo es el control del reloj de los dispositivos en función del tráfico.

B) Modelo de bucle global: Se suele implantar en diversos nodos de red y un solo servidor de gestión de red. Cada nodo consta de una función de control y medición de energía y una base de datos de estado, mientras que la función de gestión de energía se encuentra en el servidor de gestión de red. El bucle de control global abarca todos los nodos del caso y el servidor. La función de gestión de energía envía instrucciones a nivel de la red de la función de control y gestión de energía, dado que este nivel se ejecuta entre múltiples nodos. Para este bucle se supone que el servidor de gestión de red accede y controla múltiples nodos de manera centralizada.

Un ejemplo característico de este enlace es el encaminamiento deliberado que asigna la ruta con menor consumo energético.

C) Modelo de bucle combinado: Este modelo se suele implantar en múltiples nodos de red y un solo servidor de gestión de red. Cada nodo dispone de una función de control y medición de energía y una base de datos de estado, mientras que la función de gestión de energía se encuentra en el nodo de red y en el servidor de gestión de red. Los dos tipos de funciones de gestión de energía, la global y la local, constituyen dos bucles de control combinados. El bucle de control combinado, que comprende un bucle local y uno global, abarca todos ellos. La función de gestión de energía local envía instrucciones a nivel de equipo y dispositivo de la función de control y medición de energía, dado que estos niveles se ejecutan en cada nodo. La función de gestión de energía global envía instrucciones a nivel de red de la función de control y medición de energía, dado que este nivel se ejecuta entre diversos nodos. En este modelo, el servidor de gestión de red accede y controla múltiples nodos de manera centralizada y cada nodo se optimiza a sí mismo de manera distribuida.

Un ejemplo característico de este caso es el encaminamiento de energía, en el que el bucle global combina rutas de tráfico y el bucle local pone el nodo en modo reposo cuando no circula tráfico.

10 Análisis de las repercusiones del ahorro de energía

En esta cláusula se analizan las repercusiones del ahorro de energía en las redes, principalmente desde el punto de vista de la calidad de funcionamiento. En primer lugar se analiza el efecto sobre la calidad de funcionamiento de la red cuando se introducen exclusivamente tecnologías de ahorro de energía (cláusula 10.1). En segundo lugar, se analiza el efecto sobre la configuración del servicio mediante el consumo de energía, cuando se recurre a tecnologías de ahorro de energía con la nueva configuración del servicio (cláusula 10.2).

10.1 Efectos sobre la calidad de funcionamiento de la red

La integración de tecnologías de ahorro de energía puede alterar ciertos aspectos de la calidad de funcionamiento de la red, como la QoS, y también puede afectar a la seguridad.

Por una parte, las tecnologías de ahorro de energía pueden utilizar recursos o procesos adicionales, mientras que, por la otra, pueden reducir la utilización de recursos innecesarios en los ejes temporal y espacial, de modo que se utilicen los recursos mínimos, por ejemplo, el menor número de equipos o el ancho de banda mínimo. En cualquier caso, la calidad de funcionamiento de la red podría degradarse, causando así mayores demoras, congestión, interrupciones de conexión, etc. Por ejemplo, la tecnología de modo reposo puede reducir el consumo de energía, pero si el tiempo que se tarda en salir de dicho modo es grande, la comunicación podría experimentar mayores demoras. En consecuencia, es necesario evitar la degradación de la calidad de funcionamiento, o que quede comprendida dentro de cierto margen aceptable, que normalmente viene definido por el SLA (Acuerdo sobre el nivel de servicio). Esto significa que las tecnologías de ahorro de energía constituyen un equilibrio entre el ahorro de energía y la degradación de la calidad de funcionamiento. Ahora bien, la cantidad de degradación aceptable depende de los servicios de aplicación o de los sistemas de red. Por ejemplo, un servicio de correo electrónico convencional puede tolerar un retardo de varios segundos. Así, convendría determinar los efectos sobre la calidad de funcionamiento de la red y verificar si la degradación del servicio es tolerable y queda comprendida dentro de un margen aceptable.

Por consiguiente, las tecnologías de ahorro de energía deberían utilizarse cuando la degradación de la calidad de funcionamiento de la red, debida precisamente a dichas tecnologías, resulte aceptable para los servicios del caso.

Estos efectos pueden dilucidarse mediante la relación de capacidad de Shannon, por ejemplo:

- Eficiencia de despliegue respecto de la eficiencia energética.
- Ancho de banda respecto de energía, a una determinada velocidad de datos.
- Retardo respecto energía.
- Eficiencia espectral respecto eficiencia energética, para un determinado ancho de banda.

Estas relaciones son inversamente proporcionales en las fases de planificación, explotación y gestión de red [b-Chen-b] [b-Li]. Conviene tener en cuenta estas relaciones de equilibrio al plantearse ahorrar energía cuando se desee garantizar la QoS.

10.2 Efectos sobre la configuración del servicio

La configuración de un nuevo servicio, que por lo general requiere capacidades y recursos adicionales, podría aumentar el consumo de energía. Este aumento se podría limitar mediante tecnologías de ahorro de energía y la configuración del servicio.

Con la configuración de servicio, aumenta el tráfico para el servicio y se requieren recursos adicionales. Por consiguiente, es natural que aumente el consumo de energía. Sin embargo, si se introducen tecnologías de ahorro energético al mismo tiempo que la configuración del servicio, el consumo total de energía podría ser inferior del que se necesitaba inicialmente sin estas tecnologías. Por ejemplo, en una red celular convencional con una macrocélula, es posible situar la estación de

base compacta con una célula pequeña o estación de retransmisión en la zona urbana, de modo que las solicitudes de tráfico de los usuarios se puedan satisfacer consumiendo menos energía. Esto significa que las tecnologías de ahorro de energía pueden mitigar el incremento del consumo energético y aumentar la eficiencia. Por consiguiente, las ventajas de las tecnologías de ahorro energético deben evaluarse meticulosamente cuando se configuran nuevos servicios. Aun cuando se adopten tecnologías de ahorro energético más sofisticadas, puede ser posible reducir el consumo de energía hasta un punto en el que la reducción sea mayor que el incremento generado por el tráfico y recursos adicionales, y el consumo total de energía podría incluso disminuir. En cualquier caso, la configuración del servicio debe realizarse de un modo tal que el consumo de energía permanezca dentro de los límites aceptables.

Por consiguiente, al configurar un servicio, las tecnologías de ahorro energético deben aplicarse de forma que el aumento de consumo generado por la prestación simultánea de varios servicios, permanezca dentro de los límites aceptables a fin de satisfacer las necesidades de cada servicio (en cuanto a retardo, pérdidas, etc.).

11 Requisitos de alto nivel

El ahorro de energía en las redes permite a las capacidades de red y sus operaciones reducir el consumo de energía de la red en comparación con las redes existentes. Se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos:

1) Métodos (cláusula 8.2)

- Se recomienda que para ahorrar energía en las redes se reduzca el volumen de tráfico que retransmiten los dispositivos o equipos.
- Se recomienda que para ahorrar energía en las redes se aplase la transmisión de tráfico en horas punta, reduciendo así la capacidad máxima.
- Se recomienda que para ahorrar energía en las redes se controle que el funcionamiento de dispositivos y equipos sea acorde con las fluctuaciones del tráfico.
- Se recomienda que para ahorrar energía en las redes se transmita el tráfico con menos energía, recurriendo a mecanismo simplificados de transmisión de datos.

2) Funciones (cláusula 9.1)

- Se recomienda que para ahorrar energía en las redes se implante una función de control y medición de energía, una función de gestión de energía y una base de datos de estado.
- Se recomienda que la función de control y medición de energía ejerza el control necesario para reducir el consumo de energía especificado por la función de gestión de energía y mida el consumo de energía. Se recomienda incluir tecnologías a los niveles de dispositivo, de equipo y de red.
- Se recomienda que la función de gestión de energía recabe información básica, calcule el modo de funcionamiento óptimo y envíe instrucciones a la función de control y medición de energía. Se recomienda incluir subfunciones de recopilación de datos, de optimización y de operación.
- Se recomienda que la base de datos de estado contenga información básica sobre el modo actual procedente de la función de control y medición de energía, tales como el consumo energético y el tráfico.

3) Efectos sobre la calidad de funcionamiento de la red (cláusula 10)

- Al adoptar tecnologías de ahorro de energía, se recomienda aplicarlas de modo que la degradación de la calidad de funcionamiento de la red (causada por su adopción), quede comprendida dentro de los límites aceptables para los servicios.

- Al configurar el servicio, se recomienda que las tecnologías de ahorro energético se apliquen de un modo tal que el incremento del consumo, generado por la prestación simultánea de varios servicios, permanezca dentro de los límites aceptables a fin de satisfacer las necesidades de cada servicio (en cuanto a retardo, pérdidas, etc.).

12 Consideraciones medioambientales

En esta Recomendación se examina las futuras tecnologías de ahorro de energía en las redes y se analizan sus repercusiones, que contribuirán a ahorrar energía en las redes en el futuro.

13 Consideraciones relativas a la seguridad

En esta Recomendación se examinan las tecnologías de ahorro energético a distintos niveles, a saber, dispositivo, equipo y red. Se indican las interacciones cíclicas entre las funcionalidades fundamentales con el fin de definir el marco para el ahorro de energía al construir y explotar redes.

Las tecnologías estáticas no deberían representar problemas de seguridad adicionales, dado que no interactúan con el exterior. Sin embargo, en el caso de las tecnologías dinámicas podrían surgir problemas de seguridad, ya que la gestión se realiza por medio de funciones externas. Convendría tener en cuenta estos riesgos de seguridad y reducirlos al mínimo a la hora de adoptar tecnologías de ahorro de energía.

Al definir las interacciones cíclicas entre las funcionalidades fundamentales convendría tomar en consideración cómo mantener un funcionamiento estable, que es un problema general de todos los mecanismos basados en bucles de retroalimentación. Dado que este riesgo depende de los parámetros de funcionamiento de las interacciones cíclicas, estos parámetros se deben seleccionar meticulosamente. Al introducir cada sistema específico se deberán tener en cuenta otras consideraciones.

Dado que algunas tecnologías introducen la suspensión de los procedimientos, tales como el modo reposo, el tiempo de respuesta a las solicitudes del usuario puede ser diferente del modo operativo normal. En la presente Recomendación se destaca que la degradación de la calidad de funcionamiento debe permanecer dentro de los límites aceptables, especialmente cuando se trata de telecomunicaciones de emergencia y seguridad pública.

Bibliografía

- [b-ITU-T G.992.3] Recomendación UIT-T G.992.3 (2009), *Transceptores de línea de abonado digital asimétrica 2 (ADSL2)*.
- [b-ITU-T G.992.5] Recomendación UIT-T G.992.5 (2009), *Transceptores de línea de abonado digital asimétrica (ADSL2) – Transceptores ADSL2 de anchura de banda ampliada (ADSL2plus)*.
- [b-ITU-T G.997.1] Recomendación UIT-T G.997.1 (2009), *Gestión de capa física para transceptores de línea digital de abonado*.
- [b-ATIS] ATIS 2010, *ATIS Report on wireless network energy efficiency*.
- [b-IETF RFC 5412] IETF RFC 5412 (2010), *Lightweight access point protocol*.
- [b-BBFORUM] Broadband forum TR-202 (2010), *ADSL2/ADSL2plus low-power mode guidelines*, issue 1.
- [b-IEEE P802.3az] IEEE P802.3az Energy efficient Ethernet Task Force.
<<http://www.ieee802.org/3/az/index.html>>
- [b-IETF CAPWAP] IETF CAPWAP Working Group.
<<http://www.ietf.org/html.charters/capwap-charter.html>>
- [b-Badic] Badic, B. et al. (2009), *Energy efficient access architectures for green radio: large versus small cell size deployment*, *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall)*, IEEE, Abril, págs. 1-5.
- [b-Baliga] Baliga, J. et al. (2007), *Photonic switching and the energy bottleneck*, *IEEE Photonics in Switching*, Agosto, págs. 125-126.
- [b-Chabarek] Chabarek, J. et al. (2008), *Power awareness in network design and routing*, *INFOCOM 2008*, IEE, Abril, págs. 457-465.
- [b-Chen-a] Chen, Y. et al. (2010), *Characterizing energy efficiency and deployment efficiency relations for green architecture design*, IEEE, International Conference on Communications Workshops (ICC).
- [b-Chen-b] Chen, Y. et al. (2011), *Fundamental trade-offs on green wireless networks*, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, N.º 6, págs. 30-37.
- [b-Claussen] Claussen, H., Ashraf, I. and L.T.W. Ho (2010), *Dynamic idle mode procedures for femtocells*, *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 15, N.º 2, págs. 95-116.
- [b-Cui] Cui, S., Goldsmith, A.J. and Bahai, A. (2004), *Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 22, N.º 6, págs. 1089-1098.
- [b-ESTAR1] ENERGY STAR (2008), *computer specification Version 5.0*.
<http://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/revisions/downloads/computer/Version5.0_Computer_Spec.pdf?ef97-3c22>
- [b-Fettweis] Fettweis, G. and Zimmermann, E. (2008), *ICT energy consumption – trends and challenge*, *International symposium on wireless personal multimedia communications (WPMC)*, págs. 2006-2009.
- [b-Fili] Senza Fili Consulting (2010), *Compact base stations: a new step in the evolution of base station design*.
<http://www.senza-fili.com/downloads/SenzaFili_CompactBTS.pdf>
- [b-GeSI] GeSI (2008), *Smart 2020 report*, Global e-Sustainability Initiative (GeSI).

- [b-Grant] Grant, P. (2010), *Green Radio Techniques for Improved Wireless Basestation Design*, IEEE.
- [b-Huang] Huang, H., Pillai, P. and Shin, K.G. (2003), *Design and implementation of power-aware virtual memory*, usenix.org.
- [b-INST] In-Stat, *Small Cell Base Stations Vital to 4G Deployments*.
<<http://www.instat.com/newmk.asp?ID=2810&SourceID=00000652000000000000>>
- [b-Kim] Kim, Y. et al. (2010), *Analysis of energy consumption in packet burst switching networks*, 9th International Conference on Optical Internet (COIN), Julio, págs. 1-3.
- [b-Klein] Klein, T., *Next-Generation Energy Efficient Networks: Overview of the GreenTouch Consortium*, GreenTouch Consortium.
<<http://www.greentouch.org/index.php?page=member-projects>>
- [b-Li] Li, G.Y. et al. (2011), *Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues*, *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 18, N.º 6, págs. 28-35.
- [b-Nagajothy] Nagajothy, M. and Radha, S. (2009), *Network lifetime enhancement in wireless sensor network using network coding*, International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, INCACEC, Junio, págs. 1-4.
- [b-NICC ND1424] NICC ND 1424 (2008), *Guidelines on DSL power saving models and non-stationary noise in metallic access networks*.
- [b-Peng] Peng, S. et al. (2010), *Burst switching for energy efficiency in optical networks*, 2010 Conference on (OFC/NFOEC) Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, Marzo, págs. 1-3.
- [b-SCELL] Octasic, *Small cell basestations*.
<http://www.octasic.com/en/applications/wireless/small_cell.php>
- [b-Zhisheng] Zhisheng, N. et al. (2010), *Cell zooming for cost-efficient green cellular networks*, *Communications Magazine, IEEE*, Vol. 48, N.º 11, págs. 74-79.

SERIES DE RECOMENDACIONES DEL UIT-T

Serie A	Organización del trabajo del UIT-T
Serie D	Principios generales de tarificación
Serie E	Explotación general de la red, servicio telefónico, explotación del servicio y factores humanos
Serie F	Servicios de telecomunicación no telefónicos
Serie G	Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales
Serie H	Sistemas audiovisuales y multimedia
Serie I	Red digital de servicios integrados
Serie J	Redes de cable y transmisión de programas radiofónicos y televisivos, y de otras señales multimedia
Serie K	Protección contra las interferencias
Serie L	Construcción, instalación y protección de los cables y otros elementos de planta exterior
Serie M	Gestión de las telecomunicaciones, incluida la RGT y el mantenimiento de redes
Serie N	Mantenimiento: circuitos internacionales para transmisiones radiofónicas y de televisión
Serie O	Especificaciones de los aparatos de medida
Serie P	Terminales y métodos de evaluación subjetivos y objetivos
Serie Q	Conmutación y señalización
Serie R	Transmisión telegráfica
Serie S	Equipos terminales para servicios de telegrafía
Serie T	Terminales para servicios de telemática
Serie U	Conmutación telegráfica
Serie V	Comunicación de datos por la red telefónica
Serie X	Redes de datos, comunicaciones de sistemas abiertos y seguridad
Serie Y	Infraestructura mundial de la información, aspectos del protocolo Internet y redes de la próxima generación
Serie Z	Lenguajes y aspectos generales de soporte lógico para sistemas de telecomunicación