

# UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

**Informe UIT-R SM.2352-0**  
(06/2015)

## **Tendencias tecnológicas de los servicios activos en la gama de frecuencias 275-3 000 GHz**

**Serie SM**  
**Gestión del espectro**



## 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 los Informes UIT-R

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

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

*Nota: Este Informe UIT-R fue aprobado en inglés por la Comisión de Estudio conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.*

Publicación electrónica  
Ginebra, 2016

© UIT 2016

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

## INFORME UIT-R SM.2352-0

**Tendencias tecnológicas de los servicios activos en  
la gama de frecuencias 275-3 000 GHz**

(2015)

**Alcance**

El presente Informe muestra las tendencias tecnológicas de los servicios activos en la gama de frecuencias 275-3 000 GHz. El objeto de este Informe es facilitar información técnica para la elaboración de estudios de compartición y de compatibilidad entre servicios activos y pasivos, así como entre servicios activos en la gama de frecuencias 275-3 000 GHz.

## ÍNDICE

	<i>Página</i>
1	Introducción..... 3
2	Propiedades, características y aplicaciones típicas de las ondas de THz ..... 3
2.1	Visión general de las bandas de frecuencias por encima de 275 GHz ..... 4
2.2	Características de las frecuencias por encima de 275 GHz ..... 4
2.3	Aplicaciones típicas de los THz ..... 5
3	Información sobre reglamentación ..... 7
4	Comunicaciones inalámbricas en THz ..... 7
4.1	Posibles ejemplos de utilización de sistemas de comunicaciones en THz ..... 7
4.2	Tecnologías de transceptores en THz ..... 12
5	Detección y generación de imágenes..... 16
5.1	Método de generación de señales en THz ..... 16
5.2	Cámaras de THz ..... 18
5.3	Espectroscopia ..... 21
5.4	Pruebas no destructivas..... 22
6	Actividades relacionadas con los THz en organizaciones internacionales de normalización ..... 24
7	Resumen ..... 26
8	Bibliografía..... 26

**Abreviaturas y acrónimos**

ATR	Espectrometría de reflexión total atenuada
BER	Tasa de errores en los bits
BNA	N-Bencil-2-Metil-4-Mitroanilina
BWO	Oscilador de onda regresiva
DAST	Trifluoruro dietilaminoazufre
DFG	Generación de frecuencia diferencia
FEL	Laser de electrones libres
FTIR	Espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier
HBT	Transistor bipolar de heterounión
HEMT	Transistor de alta movilidad electrónica
IMPATT	Tiempo de tránsito por avalancha con ionización por choque
LoS	Línea de visión
LT-GaAs	Arseniuro de galio desarrollado a baja temperatura
MMIC	Circuito integrado monolítico de microondas
NEP	Potencia equivalente de ruido
NFC	Comunicación de campo cercano
NLoS	Fuera de la línea de visión
QCL	Laser de cascada cuántica
RTD	Diodo túnel resonante
TDS	Espectroscopia en el dominio del tiempo
TNNNET	Tiempo de tránsito de inyección en túnel
THz	Terahercio
UTC-PD	Fotodiodo de portadora progresiva única

**Referencias**

Recomendación UIT-R P.676	Atenuación debida a los gases atmosféricos
Recomendación UIT-R P.838	Modelo de la atenuación específica debida a la lluvia para los métodos de predicción
Recomendación UIT-R P.840	Atenuación debida a las nubes y a la niebla
Informe UIT-R F.2107-2	Características y aplicaciones de los sistemas fijos inalámbricos en gamas de frecuencias entre 57 GHz y 134 GHz

## 1 Introducción

Las bandas de frecuencias situadas por encima de 275 GHz no están atribuidas a servicios concretos, pero están identificadas para servicios pasivos en el Reglamento de Radiocomunicaciones (RR). La reglamentación del espectro para frecuencias superiores a 3 000 GHz está todavía en estudio de conformidad con la Resolución 118 (Marrakech, 2002). En la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2012 (CMR-12) se modificó el número **5.565** del RR con arreglo a la Resolución **950 (Rev.CMR-07)** para identificar el uso por las administraciones para aplicaciones de servicios pasivos tales como el servicio de radioastronomía, el servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasivo) y el servicio de investigación espacial (pasivo). No obstante, el uso de la gama 275-1 000 GHz por los servicios pasivos no impide su uso por servicios activos.

En 2013 se elaboró y aprobó la nueva Cuestión UIT-R 237/1, «Características técnicas y de funcionamiento de los servicios activos» para alentar a las administraciones a que estudiaran las características técnicas y de explotación de los servicios activos en la gama de frecuencias 275-1 000 GHz. Además de analizar estas características se espera que se lleven a cabo estudios de compartición entre servicios activos y pasivos teniendo en cuenta sus características de conformidad con la Cuestión UIT-R 237/1.

Gracias a los adelantos en las últimas tecnologías en frecuencias superiores a 275 GHz, los dispositivos y circuitos integrados que funcionan en esas frecuencias permiten aplicaciones complejas como la espectroscopia, la generación de imágenes, las pruebas no destructivas y las cámaras en frecuencias de THz. Aunque las ventajas de estas elevadas frecuencias son las enormes anchuras de banda que no se pueden conseguir en las bandas de frecuencias de microondas ni milimétricas, estas todavía no se utilizan para el desarrollo de sistemas de comunicaciones inalámbricos de ultra alta velocidad.

Para poder aplicar los adelantos de las tecnologías en terahercios (THz) en aplicaciones de radiocomunicaciones, es necesario y urgente comprender las tendencias tecnológicas actuales de los servicios activos en bandas superiores a 275 GHz.

Además de los adelantos de estas tecnologías, el IEEE ha creado recientemente el Grupo de tareas espaciales IEEE 802.15.3d para elaborar una norma IEEE 802 que incluya también una capa física que funcione por encima de 275 GHz. Sin embargo, todavía no se han identificado las gamas de frecuencias situadas por encima de 275 GHz para los servicios activos, ni se han establecido atribuciones a ningún servicio en el Reglamento de Radiocomunicaciones. También es urgente desde el punto de vista de la reglamentación comprender las características técnicas y de explotación de los sistemas activos para evitar interferencias a los servicios pasivos que funcionan en esa gama de frecuencias y a los servicios activos que se desarrollen y desplieguen en el futuro próximo.

Este Informe presenta una visión general de las tendencias tecnológicas de los sistemas activos en frecuencias superiores a 275 GHz y facilita información técnica para la preparación de estudios de compartición y compatibilidad. Las tecnologías que se consideran en este Informe versan sobre comunicaciones inalámbricas, detección mediante sensores y generación de imágenes en frecuencias de terahercios.

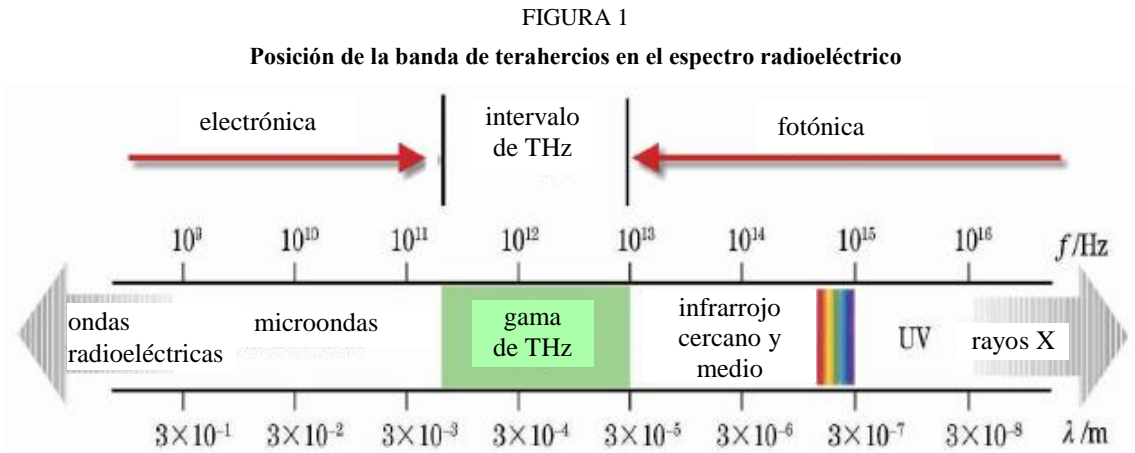
## 2 Propiedades, características y aplicaciones típicas de las ondas de THz

El desarrollo de las comunicaciones inalámbricas en terahercios se basa en las comunicaciones inalámbricas tradicionales que abarcan desde las microondas a las ondas de THz pasando por las ondas milimétricas y, en parte, por las comunicaciones inalámbricas láser. Las comunicaciones en THz no sustituirán a las comunicaciones de microondas y láser, aunque tienen ventajas únicas de las que no disponen las comunicaciones de microondas o láser.

## 2.1 Visión general de las bandas de frecuencias por encima de 275 GHz

La banda situada por encima de 275 GHz ocupa la mayor parte de la banda de terahercios. Las ondas de terahercios, conocidas normalmente como radiación submilimétrica, comprenden la banda de frecuencias 0,1 THz-10 THz que se corresponde con las longitudes de onda de 0,03 mm a 3 mm.

La Figura 1 muestra la posición de la banda de terahercios en el espectro.



## 2.2 Características de las frecuencias por encima de 275 GHz

Debido a sus propiedades únicas, las frecuencias por encima de 275 GHz tienen muchas características especiales si se comparan con otras frecuencias radioeléctricas. Las principales son las siguientes:

### 1) Alta permisividad

Las señales radioeléctricas en frecuencias superiores a 275 GHz tienen una buena penetración en muchos materiales dieléctricos y en líquidos no polarizados, de forma que pueden tomar imágenes de materiales u objetos opacos y también se podrían utilizar para pruebas no destructivas en inspecciones de seguridad o de control de calidad.

Además, su longitud de onda es mayor que las partículas de polvo o de suciedad en suspensión en el aire por lo que las pérdidas de transmisión debidas al polvo o al humo son muy pequeñas y se podrían utilizar para la toma de imágenes en entornos con humo como, por ejemplo, en operaciones de socorro en caso de incendios o en entornos con polvo como los desiertos.

### 2) Rápida atenuación en el agua

Las señales radioeléctricas por encima de 275 GHz sufren una atenuación acusada en el agua que se puede utilizar en el ámbito de la medicina. Puesto que la cantidad de agua de los tejidos tumorales es muy diferente de la de las células con tejidos normales, se pueden localizar los cancerígenos mediante el análisis del contenido en agua de los tejidos.

### 3) Seguridad

La energía fotónica de las señales de terahercios es sólo de milielectronvoltios, muy inferior a la energía de la mayoría de los enlaces químicos. Por esta razón no producirán reacciones de ionización, lo que es crucial para la detección de muestras biológicas y para el reconocimiento del cuerpo humano. Además, el agua tiene un fuerte efecto de absorción en esa banda. Puesto que las señales radioeléctricas en esas frecuencias no pueden atravesar la piel humana y son seguras para el organismo, se podrían utilizar en medicina para detectar enfermedades de la piel.



#### 4) Resolución espectral

La banda de terahercios contiene abundante información espectral, incluida información física y química. Muchas moléculas, sobre todo moléculas orgánicas, tienen propiedades relativamente intensas de dispersión y absorción en esta banda. Mediante el estudio de las propiedades espectrales de los materiales en esta banda se podrían comprender sus características estructurales, identificar su composición y analizar sus propiedades físicas y químicas.

#### 5) Alta resolución espacial

La banda de frecuencias por encima de 275 GHz tiene una resolución espacial relativamente mejor que la banda de microondas. En teoría, debido a su menor longitud de onda, su resolución de generación de imágenes es mayor que la de las microondas.

#### 6) Longitud de onda corta y buena directividad

Si se compara con las microondas, su frecuencia es mayor y podría utilizarse como portadora de comunicaciones para transportar más información por unidad de tiempo. Con una longitud de onda menor y buena directividad resulta muy prometedora para su uso en ciertos casos de aplicaciones de comunicaciones inalámbricas.

### 2.3 Aplicaciones típicas de los THz

Cuanto más se investiga en las ondas de terahercios, más se aprovechan sus asombrosas características. Actualmente esta banda se usa sobre todo para observaciones radioastronómicas pero, con la aparición de fuentes de radiación en terahercios de alta potencia, la banda por encima de 275 GHz muestra un gran potencial en muchas aplicaciones. Las posibles aplicaciones típicas son las siguientes:

#### 1) Aplicaciones en radioastronomía

La radiación celeste e interestelar contiene abundante información espectral, en gran parte en la banda por encima de 275 GHz con mucho menor ruido de fondo. Por esta razón en sus inicios la investigación y desarrollo de esta banda se dedicó a la radioastronomía. Además del telescopio de infrarrojos y del telescopio espacial Hubble se han concebido radiotelescopios en THz para estudiar el complejo estado físico de la nube interestelar de la galaxia, en particular el telescopio de infrarrojo lejano más grande del mundo.

#### 2) Aplicaciones en detección molecular

Toda la materia está en movimiento, incluso cuando un objeto parece estacionario sus moléculas internas están en rápido movimiento, puesto que donde hay movimiento hay radiación. La radiación electromagnética tiene su propia frecuencia o longitud de onda de vibración denominada «huella espectral». La mayoría de las «huellas» moleculares se encuentran en la banda infrarroja y en la banda por encima de 275 GHz. Se puede utilizar el láser de estado sólido en terahercios para detectar la radiación producida por pequeñas vibraciones moleculares que no se pueden detectar mediante rayos infrarrojos.

#### 3) Aplicaciones en la inspección de seguridad

Puesto que la mayoría de los niveles de rotación molecular de los explosivos y de las drogas se encuentra en la gama de los terahercios, la espectroscopia en la banda de THz puede llevar a cabo inspecciones de seguridad del cuerpo humano para detectar explosivos, drogas, macromoléculas biológicas y armas y otros productos de contrabando. A diferencia de la tecnología existente de imágenes de rayos X y de ultrasonidos, la espectroscopia con generación de imágenes puede no sólo mostrar la forma de un objeto sino también comparar la información espectral medida con los archivos de espectro THz existentes para identificar las propiedades del material. Además, con tan

poca energía la onda no producirá ionización perjudicial a los tejidos biológicos. Por lo tanto, cuando se compara con los inconvenientes de los rayos X que pueden producir daños en el organismo y cuyos detectores de metales no pueden detectar materiales no metálicos, la tecnología de THz tienen buenas posibilidades de utilización en la inspección de seguridad.

#### **4) Aplicaciones en biomedicina**

Las señales radioeléctricas por encima de 275 GHz son absorbidas con facilidad por moléculas polarizadas como las del agua o el oxígeno y todas las moléculas tienen su propio espectro de absorción. Mediante el uso de esas líneas espectrales y de la tecnología de generación de imágenes, se pueden diagnosticar en sus primeras fases lesiones causadas por el cáncer de piel y de otros tejidos superficiales. En cirugía se utilizan a menudo sistemas de generación de imágenes en terahercios para comprobar la escisión del cáncer en tiempo real. Con este método se consiguen unas imágenes del tejido blando más claras que con los ultrasonidos. Además, se puede utilizar el sistema espectroscópico de terahercios en el dominio del tiempo (THz-TDS) para analizar macromoléculas orgánicas cuyos niveles de energía de vibración molecular o niveles de rotación se encuentran en la gama de los terahercios y contribuir a la producción de fármacos y a la investigación médica.

#### **5) Aplicaciones en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas**

La banda por encima de 275 GHz se encuentra en la transición entre la banda óptica y la electrónica, por lo que, por su propia naturaleza, tiene las características de las comunicaciones por microondas y por ondas luminosas. En primer lugar, con la rápida evolución de las comunicaciones resulta difícil cumplir las necesidades de alta velocidad y banda ancha de las comunicaciones inalámbricas con las comunicaciones tradicionales por microondas mientras que, gracias a la elevada velocidad de transmisión de datos y de su amplia anchura de banda espectral, esta banda podría ser la protagonista de las futuras comunicaciones inalámbricas. Por otra parte, las ondas luminosas sufren una elevada atenuación al transmitirse por el polvo, las paredes, el plástico, las telas y otros materiales no metálicos o sustancias no polarizadas. La banda por encima de 275 GHz puede penetrar esas sustancias con una atenuación reducida, lo que las hace adecuadas para entornos inhóspitos. Sin embargo, esta banda también tiene sus propios inconvenientes, siendo el peor de todos que puede ser fácilmente absorbida por moléculas polarizadas en la atmósfera, por lo que su atenuación por la atmósfera es relativamente fuerte, en particular en días con lluvia. Estas características indican que se puede utilizar principalmente para futuras comunicaciones interplanetarias, comunicaciones móviles terrestres de banda ancha de corto alcance y para entornos inhóspitos como en ambientes secos o polvorientos o en un campo de batalla.

#### **6) Aplicaciones en radar**

Las aplicaciones de las ondas de terahercios en los ámbitos del radar, el reconocimiento de objetivos, el guiado de precisión y los detonadores tienen un futuro prometedor. Aprovechando las ventajas de estas longitudes de onda como la buena directividad y concentración de la energía, se pueden hacer radares de alta resolución y radares de seguimiento con bajo ángulo de elevación. Gracias a las posibilidades de generar imágenes a través de materiales, se pueden detectar objetos escondidos por una cubierta o por el humo. Aprovechando la ventaja de observar a través del polvo o del humo se pueden concebir sistemas de navegación todo tiempo y hacer posible el aterrizaje de aeronaves en la niebla. La banda de terahercios es ancha en comparación con otras bandas, por lo que dispone de mayor ancho de banda que las bandas que se utilizan hoy en día para las tecnologías de ocultación, de forma que se podrían tomar imágenes de aeronaves furtivas con radares que usen banda ultra ancha en terahercios como fuente de radiación.



### 3 Información sobre reglamentación

Durante la CMR-12 se modificó el número **5.565** del Reglamento de Radiocomunicaciones para identificar su uso por las administraciones para aplicaciones de servicios pasivos como el servicio de radioastronomía, el servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasivo) y el servicio de investigación espacial (pasivo). A continuación se muestra el número **5.565** de la edición de 2012 del RR.

#### 275-3 000 GHz

Atribución a los servicios		
Región 1	Región 2	Región 3
275-3 000	(No atribuida) MOD 5.565	

**5.565** Se han identificado las siguientes bandas de frecuencias en la gama 275-1 000 GHz para que las administraciones las utilicen en aplicaciones de servicios pasivos:

- servicio de radioastronomía: 275-323 GHz, 327-371 GHz, 388-424 GHz, 426-442 GHz, 453-510 GHz, 623-711 GHz, 795-909 GHz y 926-945 GHz;
- servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasivo) y servicio de investigación espacial (pasivo): 275-286 GHz, 296-306 GHz, 313-356 GHz, 361-365 GHz, 369-392 GHz, 397-399 GHz, 409-411 GHz, 416-434 GHz, 439-467 GHz, 477-502 GHz, 523-527 GHz, 538-581 GHz, 611-630 GHz, 634-654 GHz, 657-692 GHz, 713-718 GHz, 729-733 GHz, 750-754 GHz, 771-776 GHz, 823-846 GHz, 850-854 GHz, 857-862 GHz, 866-882 GHz, 905-928 GHz, 951-956 GHz, 968-973 GHz y 985-990 GHz.

La utilización de frecuencias de la gama 275-1 000 GHz por los servicios pasivos no excluye la utilización de esta gama por los servicios activos. Se insta a las administraciones que deseen poner a disposición las frecuencias en la gama 275-1 000 GHz para aplicaciones de los servicios activos a que adopten todas las medidas posibles para proteger los citados servicios pasivos contra la interferencia perjudicial hasta la fecha en que se establezca el Cuadro de atribución de frecuencias en la gama de frecuencias 275-1 000 GHz antes mencionada.

Todas las frecuencias en la gama 1 000-3 000 GHz pueden ser utilizadas por los servicios activos y pasivos. (CMR-12)

### 4 Comunicaciones inalámbricas en THz

Actualmente hay bastantes proyectos de investigación sobre sistemas de comunicaciones inalámbricas de banda ultra ancha en la banda de frecuencias por encima de 275 GHz. Algunos investigan sistemas de comunicaciones inalámbricas de ultra alta velocidad para las comunicaciones con Ethernet de 40-Gbit/s y de 100-Gbit/s.

Dadas la posibilidad de transmisión de alta capacidad y las elevadas pérdidas de propagación de los enlaces de comunicación que utilizan tecnologías THz, estos enlaces pueden funcionar como enlaces de acceso a la última milla. Organizaciones de I+D han realizado diversas demostraciones que utilizan frecuencias superiores a 275 GHz.

#### 4.1 Posibles ejemplos de utilización de sistemas de comunicaciones en THz

Al examinar las posibilidades de utilización de las comunicaciones en THz deben considerarse las cuestiones siguientes:

- la utilización de anchuras de bandas de frecuencia ultra anchas;

- la posibilidad de miniaturización de las antenas y de los dispositivos;
- la alta directividad y las elevadas pérdidas de espacio libre (la longitud de onda es menor que 1/5 de la de la banda de 60 GHz y, aunque las pérdidas de propagación en espacio libre son 25 veces superiores o más, se pueden compensar mediante antenas de elevada ganancia);
- el desarrollo de las tecnologías de fabricación necesarias para osciladores, amplificadores de potencia y antenas de haces orientables.

#### 4.1.1 Comunicaciones de superproximidad entre circuitos integrados y entre circuitos impresos

La Figura 2 muestra un ejemplo de utilización para una comunicación de superproximidad entre circuitos integrados y entre circuitos impresos. Está previsto que, gracias a la conexión inalámbrica entre elementos y entre circuitos impresos, se pueda suprimir el cableado y miniaturizar los substratos y dispositivos.

El Cuadro 1 muestra los requisitos típicos de este ejemplo de utilización en el que se resumen las distancias de comunicación a la hora de confeccionar circuitos integrados y/o de disponer en capas substratos realizados mediante circuitos integrados en el mismo alojamiento, distancias que varían entre unos milímetros y decenas de centímetros.

En lo que respecta a la velocidad de transferencia, ya se ha prescrito una velocidad de 10 Gbit/s para USB3.1 y para PCIeExpress 4.0, se ha normalizado una velocidad de transferencia de  $4 \text{ GB/s} = 32 \text{ Gbit/s}$  (en ambos sentidos) para la capa de enlace de datos y, además, se han especificado hasta  $4 \text{ GB/s} \times 64 = 256 \text{ GB/s}$  ( $2 \text{ Tbit/s}$ ) agrupando hasta 64 trayectos.

Aunque no siempre es necesario soportar comunicaciones que superen el Tbit/s, en las comunicaciones entre circuitos integrados y circuitos impresos en THz, se necesitarán transmisiones de velocidad ultra alta de por lo menos algunas decenas de Gbit/s.

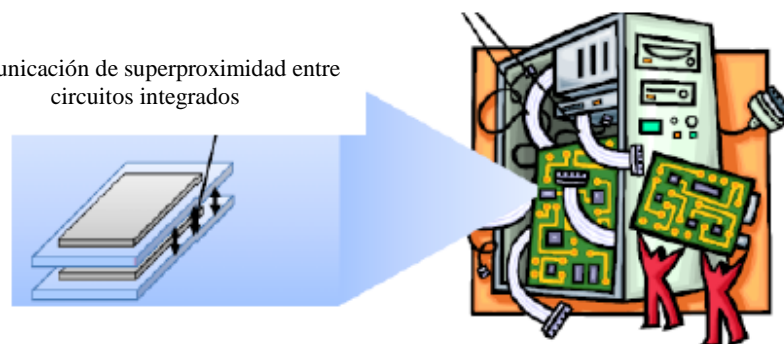
En relación con el entorno de propagación, es necesario analizar tanto la comunicación LoS como NLoS como modelo de proximidad o de superproximidad en un alojamiento metálico que genera fuertes ondas reflejadas. Es necesario considerar el efecto de la propagación por trayectos múltiples entre dispositivos muy próximos y de los múltiples trayectos causados en las paredes internas del alojamiento por la penetración de las ondas THz a través de los substratos.

FIGURA 2

#### Ejemplo de utilización de comunicación de superproximidad entre circuitos integrados y entre circuitos impresos

Comunicación de superproximidad entre circuitos impresos

Comunicación de superproximidad entre circuitos integrados



CUADRO 1

**Requisitos típicos**

Distancia de comunicación	De unos mm a algunos cm (superproximidad a proximidad)
Velocidad de datos	Unas decenas de Gbit/s
Entorno de propagación	Superproximidad del alojamiento y modelo de proximidad (LoS/NLoS)
BER requerida	$10^{-9}$

**4.1.2 Sincronización de contenidos con la nube mediante comunicaciones en campo cercano**

La Figura 3 muestra un ejemplo de sincronización de contenidos con la nube mediante comunicaciones en campo cercano. Últimamente han crecido con rapidez los servicios que utilizan la nube junto con los servicios de colaboración entre los teléfonos inteligentes y la nube.

El servicio de almacenamiento es un servicio en la nube que guarda fotos y vídeos de un usuario de teléfono inteligente a través de la red sin que el usuario sea consciente de este proceso de sincronización. Sin embargo, la comunicación por paquetes 3G y LTE que usan los teléfonos inteligentes a menudo para sincronizar contenidos en la nube sin que el usuario se dé cuenta de ello, da lugar a un aumento inesperado del consumo de la batería.

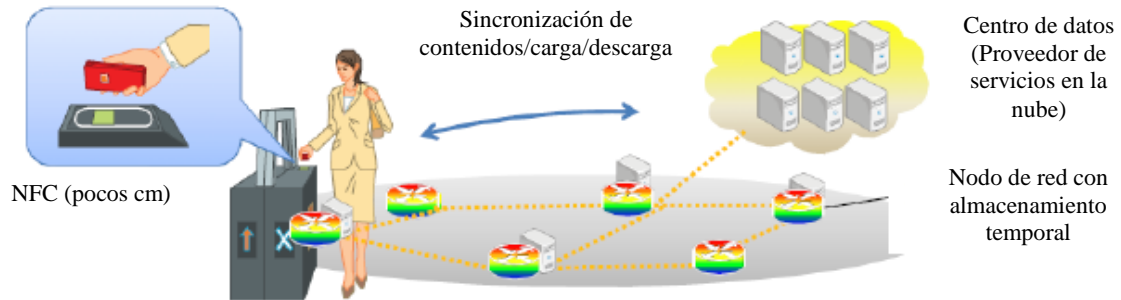
Este ejemplo de utilización implica que, además de la función de cobro en las taquillas automáticas en estaciones ferroviarias, los usuarios pueden disponer de teléfonos inteligentes equipados con una función de comunicación en THz. Al mismo tiempo que pasa por la barrera de acceso de la estación de camino a su oficina o su colegio la sincronización de contenidos mediante la comunicación en THz reducirá el consumo de la batería del teléfono.

El Cuadro 2 muestra los requisitos típicos de este caso. Aunque la distancia de comunicación es inferior a unos pocos centímetros, para sincronizar un volumen o contenido de datos adecuado durante un periodo de tiempo muy corto, de un segundo aproximadamente, es conveniente que la velocidad de comunicación sea lo más rápida posible. Para ello, será necesario desarrollar, además de la velocidad de comunicación, un sistema de autenticación y de asociación que permita un tiempo de establecimiento del enlace muy breve. Por otra parte, aunque sean viables comunicaciones en campo cercano en frecuencias de THz con velocidades superiores a 100 Gbit/s, es preciso investigar si la velocidad de lectura y de escritura, de las que disponen los teléfonos inteligentes de este caso, son compatibles con esta elevada velocidad de transmisión. Por ejemplo, la velocidad de lectura y de escritura de los discos de estado sólido (SSD) que actualmente figuran como los más rápidos del mundo, es de cerca de 500 Mbytes/s (4 Gbit/s).

También se supone que el entorno de propagación será un modelo de proximidad entre dispositivos que aplica únicamente a LoS. Es necesario estudiar si las reflexiones multitrayecto entre dispositivos en proximidad afectará o no a las necesidades de transferencia.

FIGURA 3

**Ejemplo de utilización de sincronización de contenidos con la nube mediante comunicaciones de campo cercano**



CUADRO 2

**Requisitos típicos**

Distancia de comunicación	Hasta unos pocos cm (proximidad)
Velocidad de datos	4 Gbit/s – algunas decenas de Gbit/s
Entorno de propagación	Modelo de proximidad entre dispositivos (LoS)
BER requerida	$10^{-12}$

**4.1.3 Comunicación inalámbrica entre servidores en un centro de datos**

La Figura 4 muestra un ejemplo de utilización de las comunicaciones en THz entre servidores en el interior de un centro de datos. Últimamente ha aumentado con rapidez el número de servicios que utilizan la nube y se ha impulsado la construcción de centros de datos. En general, en los centros de datos se encuentran varios bastidores equipados con diversos servidores entre los que se incluyen centrales múltiples y de almacenamiento, por lo que es conveniente poder suprimir el cableado entre los servidores en un mismo bastidor y entre bastidores.

El Cuadro 3 muestra los requisitos típicos de este ejemplo. Las distancias de comunicación varían entre unos pocos centímetros, suponiendo que la conexión entre servidores en un bastidor está dispuesta verticalmente, hasta algunos metros en el caso de conexiones entre bastidores.

En lo que respecta al entorno de propagación, es necesario considerar LoS y NLoS en el supuesto de que se utilice un modelo de oficina en el que los materiales de construcción tienen una permeabilidad relativamente baja (alta reflectividad) pero si consideramos un caso particular en el que el bastidor de servidores se encuentra cerca de la pared y se sustituyen las conexiones por cables entre los paneles traseros por enlaces de comunicaciones en THz, se puede aplicar un modelo de dos rayos entre los paneles traseros.

FIGURA 4

Comunicaciones inalámbricas entre servidores en un centro de datos



CUADRO 3

**Requisitos típicos**

Distancia de comunicación	Unos pocos cm – unos pocos m (proximidad)
Velocidad de datos	Algunas decenas de Gbit/s – algunos centenares de Gbit/s
Entorno de propagación	Modelo de oficina/modelo de dos ondas (LoS/NLoS)
BER requerida	$10^{-12}$

**4.1.4 Enlace de conexión/conexión frontal inalámbricos**

Un enlace de conexión es una conexión entre la estación base y un elemento de red más centralizado, mientras que el enlace de conexión frontal es el enlace entre el controlador del equipo radioeléctrico de una estación base y la cabecera de radio distante (unidad de radio). Los desarrollos futuros como el despliegue masivo de células pequeñas, la implementación de la transmisión de coordinación multipunto (CoMP) y/o las redes de acceso radioeléctrico a la nube (C-RAN) pueden aumentar las velocidades de datos necesarias para el enlace de conexión, la conexión frontal o ambos. Puede resultar atractivo realizar estos enlaces utilizando enlaces inalámbricos en situaciones en las que no se dispone de enlaces por fibra.

En los casos en que se precisen varias decenas de Gbit/s se puede considerar la gama de frecuencias de THz como una solución atractiva. En una demostración descrita en [1] se ha logrado una velocidad de datos de 24 Gbit/s con una distancia de enlace de 1 km.

CUADRO 4

**Requisitos típicos**

Distancia de comunicación	500 m a 1 km
Velocidad de datos	Hasta 100 Gbit/s
Entorno de propagación	Exterior
BER requerida	No se ha facilitado

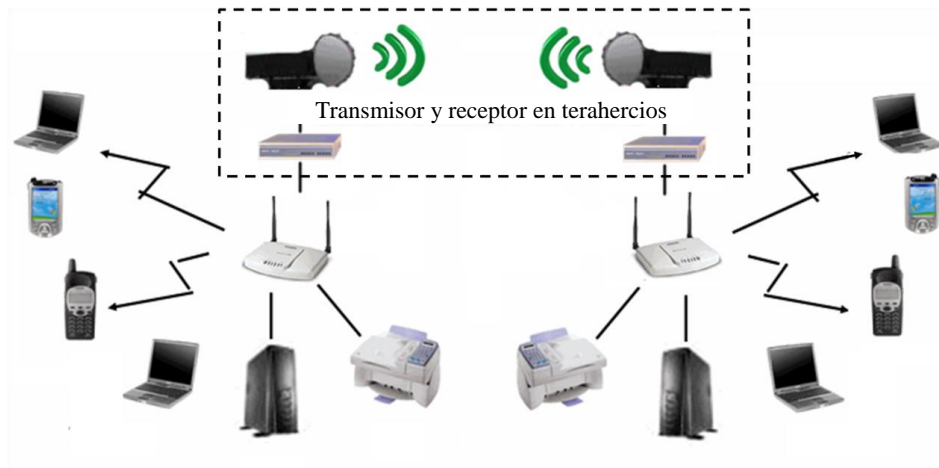
**4.1.5 Red de área local inalámbrica en THz (THz WLAN)**

La Figura 5 muestra un caso de red de área local inalámbrica en THz (WLAN). Con el desarrollo de la tecnología de comunicación inalámbrica, la WLAN representa un papel cada vez más importante

en nuestras vidas al liberar a los usuarios de las limitaciones de los cables. Actualmente, al igual que Internet y las redes de comunicaciones móviles, la WLAN se ha convertido en un medio importante de transmisión de información y se utiliza ampliamente en aeropuertos, oficinas, restaurantes, domicilios, etc. Las frecuencias de terahercios son de uno a cuatro órdenes de magnitud superiores a las microondas y sus velocidades de datos pueden ser de 10 Gbit/s. Teniendo en cuenta sus características de alta velocidad, amplia banda, estructura compacta, pequeño tamaño, bajos daños de radiación y fuerte resistencia a las interferencias, las WLAN en THz se pueden utilizar en el futuro en aplicaciones militares y comerciales, tales como videoteléfonos de alta calidad, videoconferencias, juegos en 3D, etc.

FIGURA 5

## Ejemplo de utilización de una THz WLAN



CUADRO 5

## Requisitos típicos

Distancia de comunicación	Unos pocos metros
Velocidad de datos	De pocos Mbit/s a pocas decenas de Mbit/s
Entorno de propagación	Oficinas, aeropuertos, restaurantes
BER requerida	$\leq 1 \times 10^{-6}$

## 4.2 Tecnologías de transceptores en THz

### 4.2.1 Transceptor de 300 GHz mediante MMIC

La Figura 6 muestra un diagrama de bloques de la estructura general de un módulo transmisor. Se montan una antena de bocina, el amplificador de potencia, el modulador y el multiplicador en un conjunto metálico de microondas. El multiplicador multiplica la portadora de 75 GHz generada por el oscilador local y las señales de 20 GHz llegan al modulador. Para comprobar el módulo de transmisión se configura un sistema de evaluación mediante la instalación de un módulo receptor. Este módulo está constituido por una antena de bocina estándar (24 dBi) y un módulo en guía de onda equipado con un diodo Schottky. La Figura 7 muestra el espectro medido de una señal MDA de 20 Gbit/s (300 GHz) a la salida del amplificador de potencia. Como muestra la Figura 8, se observa una señal moduladora con una frecuencia central de 300 GHz $\pm$ 20 GHz en el espectro de salida del modulador.

FIGURA 6  
Diagrama de bloques del módulo transmisor

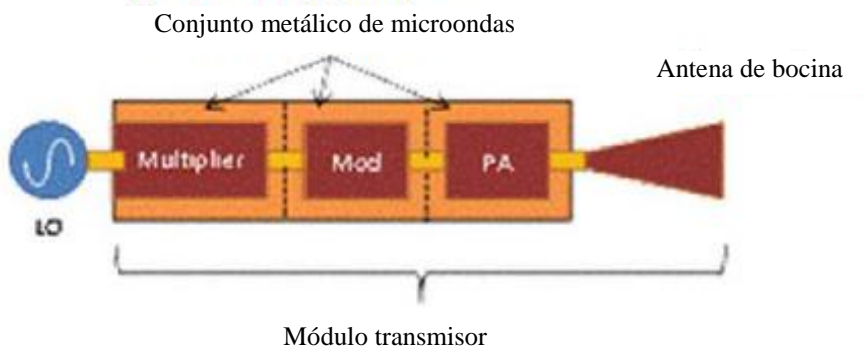


FIGURA 7  
Diagrama de la señal de 20 Gbit/s del módulo transmisor

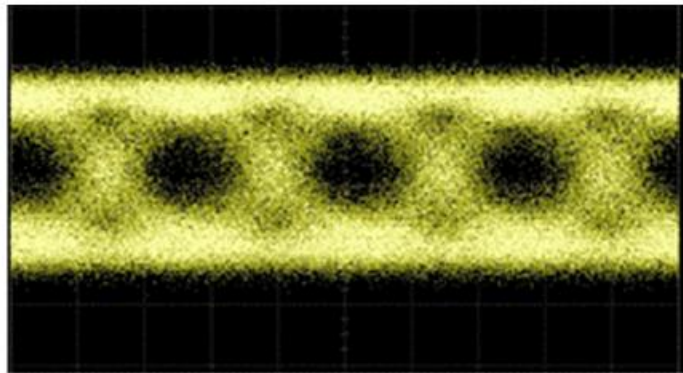
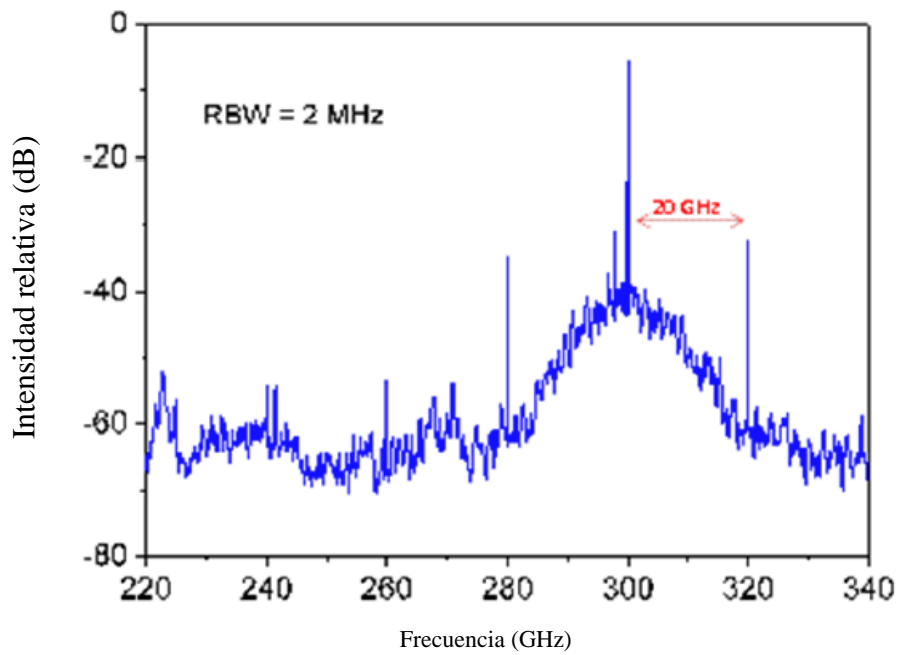


FIGURA 8  
Espectro a la salida del amplificador de potencia





En [1] se informa de otro enfoque con tecnología MMIC en el que se presenta un transmisor de subarmónicos en cuadratura que funciona en 240 GHz. Las características del transmisor figuran también en [1]. Aunque en esta solución la frecuencia de la portadora se encuentra por debajo de 275 GHz, la información ofrece algunas claves sobre las características del transceptor, que se espera se encuentren en la gama baja de las frecuencias de THz.

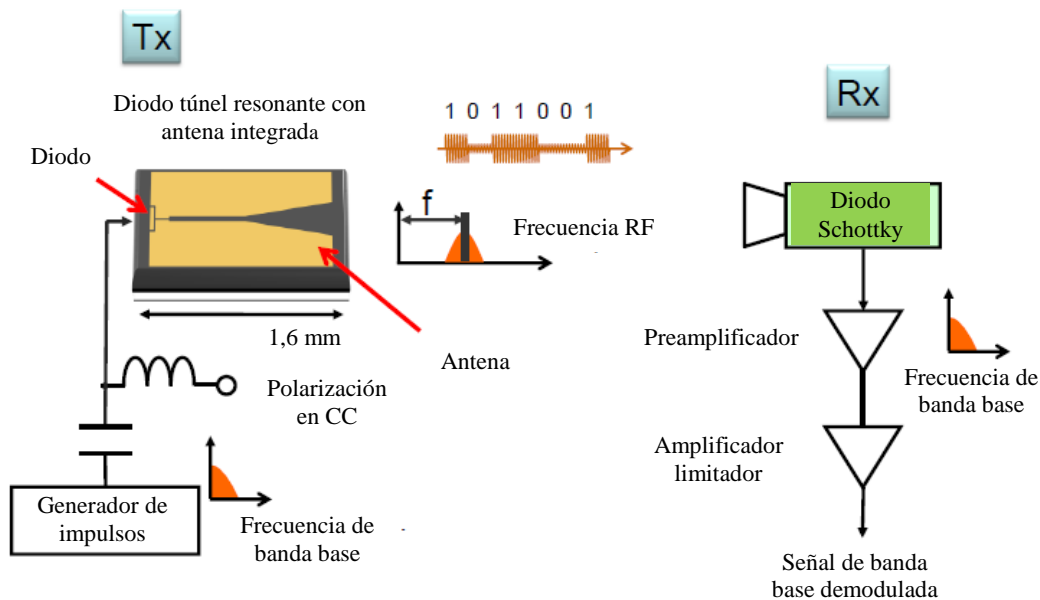
En [2] se presenta un sistema de comunicación inalámbrica que funciona en 237,5 GHz capaz de lograr una velocidad de 100 Gbit/s en una distancia de 20 m. Mientras que en el extremo receptor se utiliza la misma tecnología que en [1], en el extremo transmisor se aplica un planteamiento fotónico mediante el uso de un fotodiodo de arseniuro de indio y galio cuya señal de salida se radia mediante una antena con focalización de haz.

#### 4.2.2 Transceptor de 300 GHz que utiliza RTD

El oscilador es el denominado diodo túnel resonante (RTD), que oscila con una tensión de polarización CC apropiada. Al modificar la tensión de polarización, se modula la portadora de 300 GHz como todo o nada en función de la amplitud de la tensión de polarización. En lo que respecta al receptor, se utiliza un receptor de detección directa, como muestra la Fig. 9. La velocidad binaria máxima fue de 1,5 Gbit/s y la transmisión de las señales de TVAD sin compresión se realizó mediante tecnologías de diodo. También se ha demostrado que el RTD puede utilizarse como detector con una alta sensibilidad. Así mismo se consiguió una transmisión sin errores de 2,5 Gbit/s a 625 GHz mediante el uso de multiplicadores de frecuencia en el transmisor.

FIGURA 9

Diagrama de bloques del enlace inalámbrico con tecnologías diodo

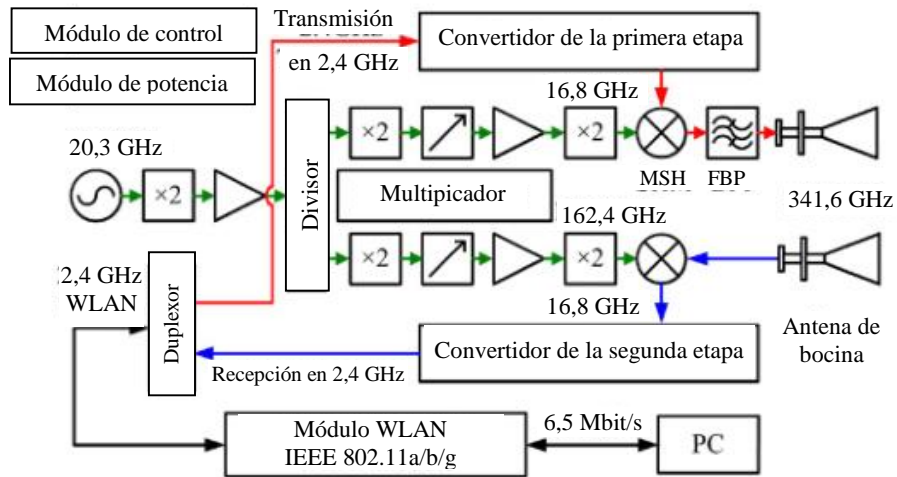


#### 4.2.3 WLAN de 0,34 THz basada en IEEE802.11

La Figura 10 muestra el esquema de una WLAN en 0,34 THz que se ha realizado mediante un extremo transceptor de comunicación inalámbrica basado en semiconductores de estado sólido y un dispositivo WLAN basado en la norma IEEE802.11. La velocidad de datos de la WLAN de 0,34 THz puede ser de 6,536 Mbit/s en 50 m y su BER es inferior a  $10^{-6}$ . La capa MAC y parte de la capa física se establecen mediante un módulo inalámbrico comercial IEEE802.11 que funciona a una velocidad de 150 Mbit/s en 2,4 GHz. La portadora de 2,4 GHz basada en IEEE802.11 se puede transformar hasta en 16,8 GHz mediante un mezclador. La señal de la portadora de 16,8 GHz se recibe en el extremo transceptor de la WLAN de 0,34 THz que la convierte en 0,34 THz y la transmite por la

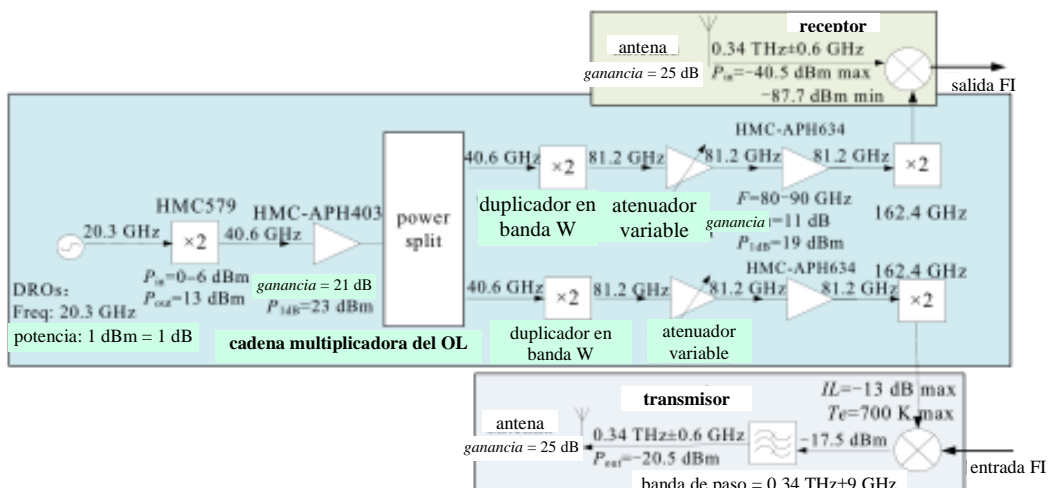
antena. Si el extremo transceptor de 0,34 THz recibe la señal, la convierte en 2,4 GHz y la envía al dispositivo inalámbrico IEEE802.11.

FIGURA 10  
Representación esquemática del nodo WLAN de 0,34 THz



La Figura 11 muestra la estructura de la etapa de entrada del transceptor de 0,34 THz que se compone de un filtro de cavidad en 0,34 THz, un mezclador de armónicos, una cadena de doble frecuencia en 0,17 THz y un circuito de ajuste de alimentación. El mezclador de armónicos de 0,34 THz es el módulo más importante de la etapa de entrada del transceptor; su principio de funcionamiento se basa en el efecto corriente-tensión (I-V) no lineal del diodo schottky antiparalelo. La cadena de doble frecuencia en 0,17 GHz con una estructura de 8 armónicos proporciona la señal de oscilación al mezclador de armónicos de 0,34 THz, que está compuesto por un multiplicador de doble frecuencia de banda Q, un amplificador en banda Q, un divisor de potencia en banda Q, un multiplicador de doble frecuencia en banda W, un atenuador ajustable en banda W, un amplificador en banda W, un multiplicador de doble frecuencia en banda G, etc. También incluye un circuito multiplicador de doble frecuencia de tercer orden y un amplificador de segundo orden.

FIGURA 11  
Etapa de entrada del transceptor WLAN de 0,34 THz



## 5 Detección y generación de imágenes

Las ondas de THz tienen cierta capacidad de penetración en sustancias y permiten una buena resolución espacial, también disponen de características únicas que no tienen otras bandas de frecuencias electromagnéticas, tales como determinar la huella espectral de reactivos, diferenciar DNA de doble cadena del de cadena única, distinguir la diferencia de absorción del agua y del hielo y ser sensible a las impurezas de los semiconductores. Además, las ondas de THz no son perjudiciales para el cuerpo humano. Con estas premisas se puede esperar una amplia gama de aplicaciones de detección y de generación de imágenes.

### 5.1 Método de generación de señales en THz

El Cuadro 6 presenta la relación entre los métodos de generación de señales en THz y sus tecnologías.

CUADRO 6

#### Métodos de generación de THz y sus tecnologías

Método de generación	Tecnología empleada	Material	Función
Excitación fotónica de impulso ultracorto	Antena fotoconductora	LT-GaAs	THz-TDS Funcionamiento a temperatura ambiente
Óptica no lineal	DFG paramétrico	GaAs, GaP, GaSe, ZGP, PPLN, BD-GaAs, OP-GaAs	Longitud de onda variable Funcionamiento a temperatura ambiente
Mezcla fotónica	Fotoconductor UTC-PD	LT-GaAs InP/InGaAs	Funcionamiento a temperatura ambiente
Laser	QCL	GaAs/AlGaAs, InGaAs-AlInAs/InP	Ancho de línea estrecho Funcionamiento a temperatura criogénica
Electrónica de estado sólido	Gunn, IMPATT, RTD Semiconductor compuesto	GaAs, InP, Si AlAs/GaInAs/AlAs HBT, HEMT, mHEMT, pHENT	Longitud de onda fija Funcionamiento a temperatura ambiente
Tubo electrónico	BWO, Girotrón		Longitud de onda variable Funcionamiento a temperatura ambiente

#### 1) Excitación fotónica de impulso ultracorto

Actualmente es el método más utilizado para generar impulsos en THz. Al excitar con fotones un cristal no lineal (NLC), una antena fotoconductora (PCA), semiconductores y superconductores, etc., mediante un láser de impulsos ultracortos con una duración de cerca de un femtosegundo, se pueden conseguir modulaciones de corriente fotoconductoras en los semiconductores inferiores al picosegundo y se puede generar un impulso óptico en THz de banda ancha utilizando polarización no lineal secundaria (rectificación de la luz) mediante medios no lineales no resonantes. Este método se utiliza ampliamente para la espectroscopia en THz en el dominio del tiempo (THz-TDS).

La THz-TDS tiene una relación señal ruido (S/N) extremadamente elevada en comparación con el espectrofotómetro de infrarrojo lejano con transformada de Fourier que utiliza una fuente luminosa térmica convencional y se está aplicando, entre otros, en espectroscopia y generación de imágenes en THz. Aunque se debe seleccionar la estructura, el tipo de cristal y la longitud de onda de excitación

del láser para la estructura de la antena fotoconductor, el semiconductor y el cristal no lineal, respectivamente, gracias a los adelantos recientes en tecnología láser de pulso ultracorto, se puede obtener un pulso en THz con una gran intensidad de campo eléctrico mediante el uso de un amplificador regenerativo para generar luz pulsada de alta intensidad.

## 2) Óptica no lineal

Este método de generación está clasificado como generación paramétrica y generación por frecuencia diferencia (DFG). La generación paramétrica implica una conversión de longitud de onda mediante polaritones de fonones en el interior de cristales no lineales tales como el LiNbO<sub>3</sub>. Se caracteriza por longitudes de onda ajustables y funcionamiento a temperatura ambiente y es posible la miniaturización de la fuente de luz y de los láseres de excitación. Últimamente se ha conseguido un pulso en THz con una intensidad de pico superior a 1 kW, lo que es comparable con los valores obtenidos con láseres de electrones libres (FEL).

Por otra parte, la generación por frecuencia diferencia (DFG) es la generación de una frecuencia diferencia aprovechando el efecto óptico no lineal secundario de los cristales no lineales. En los últimos años se han publicado métodos de generación con cristales orgánicos tales como DAST y BNA y, en términos de intensidad de generación, se han indicado intensidades de salida de mW mediante DFG en cavidades.

## 3) Mezcla fotónica

Al inyectar luz láser de dos longitudes de onda en un dispositivo fotoconductor o fotodiodo, se puede generar una onda de THz que es una frecuencia óptica diferencial aplicando la conversión fotoeléctrica mediante mezcla fotónica. Con un fotodiodo se puede generar luz con una frecuencia superior a 1 THz gracias al fotodiodo de portadora progresiva única (UTC-PD) que tiene características de alta velocidad y gran intensidad de salida.

## 4) Láser

El láser de cascada cuántica (QCL) dispone de una estructura estratificada con materiales semiconductores con diferentes alturas de las barreras de energía del orden de los nanómetros de espesor que consigue una oscilación láser mediante las transiciones entre subbandas. Aunque, en principio, existirá una anchura de línea muy estrecha, en realidad se limita a un funcionamiento en baja temperatura (la temperatura de funcionamiento máxima mediante excitación de pulso es de 200 K). Sin embargo, la potencia de salida a una frecuencia superior a 1 THz es relativamente grande.

## 5) Electrónica de estado sólido

Tradicionalmente se ha desarrollado mediante dispositivos de microondas y de ondas milimétricas. Los diodos Gunn utilizan transiciones entre bandas de conducción con diferentes masas efectivas y los diodos de tiempo de tránsito por avalancha con ionización (IMPATT) y los diodos de tiempo de tránsito de inyección de túnel (TNETT) son diodos de tiempo de tránsito que generan zonas de campo intenso en las que se desplazan los electrones.

Los diodos RTD están constituidos por una estructura con doble barrera con una capa fina semiconductor para lograr resistencia diferencial negativa donde se produce el fenómeno túnel para obtener una oscilación básica con una frecuencia superior a 1 THz (la potencia de salida es pequeña).

Entre los dispositivos semiconductores reales de alta frecuencia que se usan actualmente en osciladores, amplificadores e incluso en MMIC (circuitos integrados monolíticos en microondas) se encuentran los HBT (transistor bipolar de heterounión) que utiliza semiconductores compuestos y los HEMT (transistor de alta movilidad de electrones). Se espera que los semiconductores de tipo InP, con características materiales como una gran movilidad de electrones, sean más rápidos pero también se ha informado de dispositivos que funcionan en frecuencias superiores a algunos centenares de GHz

cuando se aplican tecnologías como pHEMT (HEMT pseudomórfico) y mHEMT (HEMT metamórfico) que son candidatas para velocidades mayores.

## 6) Tubo electrónico

El oscilador de onda regresiva (BWO) genera la onda de THz mediante la interacción entre el circuito de onda lenta y los electrones; mediante la radiación Smith-Purcell gracias al efecto Smith-Purcell que se produce cuando los electrones pasan sobre una retícula metálica de difracción; mediante el girotrón por la acción del máser de resonancia ciclotrónica que implica cambios en la masa de los electrones debido al efecto relativista. Aunque la potencia de salida es elevada, también son grandes sus dimensiones.

## 5.2 Cámaras de THz

A continuación se muestran las tendencias de los sensores bidimensionales en THz que se basan en la tecnología de sensores infrarrojos no refrigerados de tipo bolómetro.

La Figura 12 muestra una imagen de una cámara infrarroja con un sensor con 320 x 240 píxeles de 23,5  $\mu\text{m}$  cuando se ilumina mediante un QCL con una frecuencia de 3,1 THz. En este caso la estructura de los píxeles tiene una capa adicional de absorción, por lo que, al ajustar la resistencia de la hoja metálica de película delgada respecto de la impedancia del vacío de 377  $\Omega$ , se puede mejorar en cerca de 1 dígito (Fig. 13(a)) la sensibilidad a 3 THz aproximadamente. Además, se ha desarrollado el sensor de THz de banda estrecha que se muestra en la Fig. 13(b) con el fin de mejorar la sensibilidad entre 2 y 4 veces solo para determinadas longitudes de onda.

La Figura 14 muestra la longitud de onda en función de la potencia equivalente de ruido (PER) para los sensores de THz de banda ancha y de banda estrecha. Como se puede observar al analizar las características del sensor de banda ancha, la PER es aproximadamente plana para longitudes de onda entre 3  $\mu\text{m}$  y algo menos que 200  $\mu\text{m}$  y empieza a empeorar por encima de los 200  $\mu\text{m}$ . La Figura 15 y el Cuadro 6 muestran una imagen y las especificaciones de una cámara de THz de pequeñas dimensiones equipada con uno de los dos tipos de sensores, el sensor de THz de banda ancha. Cuando se utiliza con una lente de silicio de alta resistividad, se aplica sobre el silicio una película de parileno como capa no reflectante. Así mismo, se sitúa delante de la lente de THz un filtro de bloqueo de infrarrojo (filtro metálico en forma de malla que permite la transmisión de longitudes de onda superiores a unos 30  $\mu\text{m}$ ). Esta cámara se puede controlar mediante un ordenador, accediendo por el puerto USB 2.0, que también puede grabar los datos de las imágenes digitales.

FIGURA 12 (A)  
Sensor de THz de banda ancha

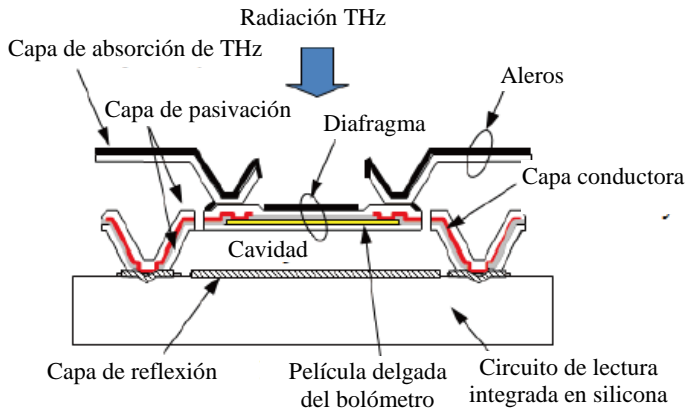


FIGURA 12 (B)  
Sensor de THz de banda estrecha

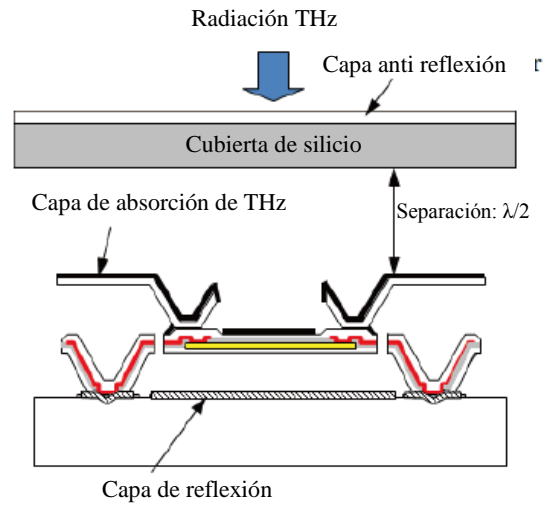


FIGURA 13  
Diagrama del haz QCL de un sensor de THz con 320 x 240 píxeles de 23,5 μm

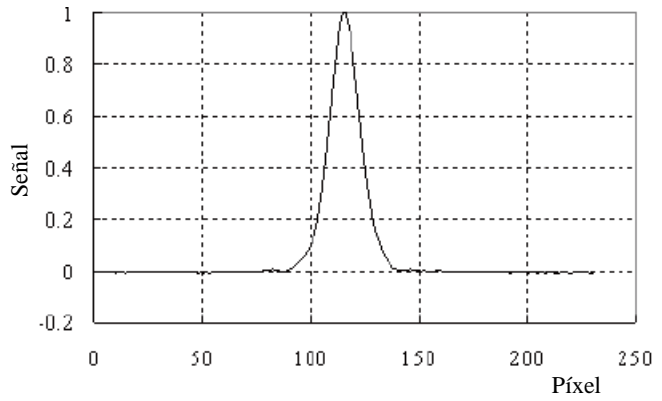
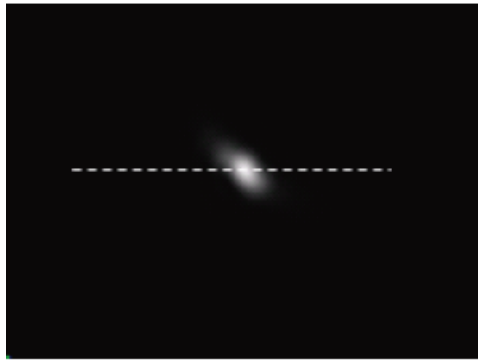


FIGURA 14

PER en función de la longitud de onda de un sensor de THz

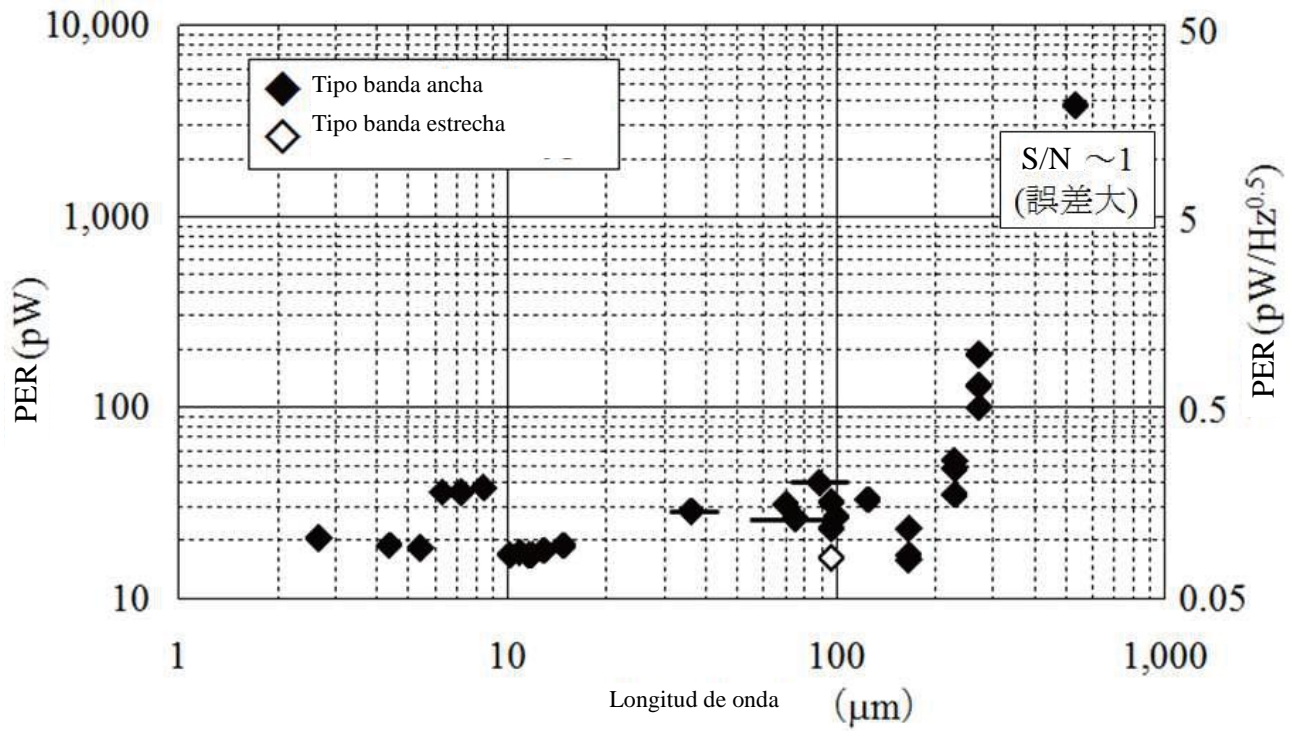


FIGURA 15

Imagen de una cámara de THz





CUADRO 7

**Especificación de una cámara de THz**

Método	Tipo de bolómetro
Formato del sensor	Cantidad de píxeles: 320 × 240 Tamaño de píxel: 23,5 μm
Campo de visión	Aprox. 15° × 11° (cuando disponen de lentes de 28 mm de distancia focal)
Velocidad de trama	30 Hz
Salida	Datos de imagen digital: USB2.0 Señal síncrona: BNC
Función de imagen sincronizada	Señal síncrona: 15 Hz, 7,5 Hz, 3,75 Hz, 1,875 Hz (Salida TTL: +5V)
Función de tratamiento de señal	Integración de trama Filtro espacial
Peso	Aprox. 550 g (sin lente ni filtro)

**5.3 Espectroscopia**

Los sistemas espectroscópicos se pueden clasificar en espectrómetros infrarrojos convencionales de transformada de Fourier (FTIR), sistemas espectroscópicos de barrido de longitud de onda y sistemas espectroscópicos en THz en el dominio del tiempo (THz-TDS). El sistema de Martin-Puplet que es una ampliación de la tecnología infrarroja convencional constituye un ejemplo de FTIR. Los sistemas espectroscópicos de barrido de longitud de onda utilizan un tubo de ondas regresivas para modificar directamente la longitud de onda de una señal de THz y métodos de frecuencia diferencia que utilizan dos láseres de longitud de onda variable, aunque estos últimos tienen problemas con la gama de variación y con la precisión de la longitud de onda.

**5.3.1 THz-TDS (espectroscopia en el dominio del tiempo)**

En la última década se ha desarrollado una nueva herramienta poderosa para la medición de la gama de los terahercios denominada THz-TDS. Las formas de onda eléctricas de impulsos monociclo de radiación en THz se generan y miden mediante la detección controlada con un impulso láser breve de espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIR). Normalmente, el impulso de radiación monociclo en THz incluye una gama espectral muy amplia, entre 100 GHz y 10 THz. Este método se está popularizando para el análisis de materiales.

**5.3.2 Espectroscopia FTIR (infrarroja de transformada de Fourier)**

Muchos materiales tienen las denominadas huellas espectrales en la gama de frecuencias por encima de 275 GHz. De hecho desde los años sesenta se ha utilizado la espectroscopia en gamas de frecuencias por encima de unos 1 000 GHz y ya se han desarrollado algunos productos comerciales. El sistema cubre toda la banda de frecuencias hasta el infrarrojo medio. En la banda del infrarrojo medio el espectro depende de lo que ocurre en el interior de las moléculas y se dispone de un catálogo de los espectros de casi todos los productos químicos habituales. De esta forma, los químicos pueden utilizar un sistema comercial como herramienta común para identificar materiales desconocidos. En la región del infrarrojo lejano, o en la banda de THz, las huellas espectrales dependen del comportamiento entre las moléculas, de la absorción de fonones, de los enlaces del hidrógeno o de condiciones moleculares similares. Al contrario que para el infrarrojo medio, no existe catálogo comercial de espectros.

### 5.3.3 Análisis de materiales

Aplicando la espectroscopia THz-TDS se pueden analizar las propiedades de sólidos y líquidos. Por ejemplo, la polarimetría en la banda de THz se usa para evaluar las características de birrefringencia de los materiales en cada frecuencia. Gracias a esta capacidad de evaluación, también se están empezando a comercializar para el desarrollo de nuevos materiales dispositivos equipados con funciones de análisis tales como el análisis de isómeros ópticos en polímeros. Por otra parte, aunque las ondas de THz son muy sensibles a la absorción por el agua, ha sido posible medir muestras con contenido de agua, lo que tradicionalmente se consideraba difícil en la práctica, utilizando espectrometría de reflexión total atenuada (método ATR) en frecuencias de THz.

Con este método, se pueden obtener las características de una muestra sin introducir agua. También es posible detectar células en un fluido de cultivo mediante el método ATR y se está empezando a considerar un método efectivo para las aplicaciones en biotecnología.

## 5.4 Pruebas no destructivas

### 5.4.1 Aplicaciones a productos industriales

La demanda de generación de imágenes de productos industriales en frecuencias de THz sigue siendo muy fuerte. Esto se debe a que para ver en luz visible a través de objetos opacos sólo se pueden utilizar ondas radioeléctricas en las bandas de THz o rayos X. El manejo de radiación ionizante como los rayos X es arriesgado e implica limitaciones, mientras que las ondas radioeléctricas en las bandas de THz tienen poca energía cuántica y no son ionizantes, además, los rayos X son normalmente problemáticos a la hora de detectar elementos ligeros como el carbono. Si se compara, por ejemplo, con las microondas que, por definición, tienen mayores longitudes de onda y menor resolución de imagen (resolución espacial), las ondas milimétricas y submilimétricas, con una resolución espacial del orden de milímetros o superior, resultan mucho más útiles para aplicaciones de generación de imágenes.

Entre los productos industriales son abundantes en nuestra vida cotidiana los materiales no metálicos que transmiten ondas de THz. Algunos productos entre los más típicos están hechos de plástico, vinilo y papel, mientras otros son cerámicos o de caucho y gozan de diversas funciones, a menudo con alto valor añadido. Por ejemplo, en medicina existen componentes que aprovechan la resistencia de la cerámica y la flexibilidad del caucho. Estos productos son muy utilizados en el ámbito de la energía y de la medicina y resultan muy necesarios para la detección de partículas extrañas. El tamaño de los defectos es a menudo de por lo menos 1–10  $\mu\text{m}$  y se requiere una relación S/N y una velocidad altas.

La tecnología CT en THz es prometedora para la generación de imágenes en pruebas no destructivas que no se pueden realizar con rayos X. Las ondas de THz que pueden obtener información espectroscópica pueden detectar defectos, así como información sobre el tipo de defecto, y están resultando atractivas porque pueden aportar nuevo valor añadido a los análisis. Entre los defectos que requieren detección se encuentran las partículas extrañas, así como las irregularidades en películas delgadas y defectos en los recubrimientos, etc.

La precisión deseada en grosor es generalmente de unos pocos  $\mu\text{m}$ , pero en una inspección de sustratos de semiconductores, por ejemplo, existen casos en los que las características eléctricas requieren grosores de película delgada de menos de algunos centenares de nm. Aunque siempre se había considerado que medir una película tan delgada mediante ondas de THz sería difícil, gracias a los recientes adelantos tecnológicos, se está empezando a demostrar que es posible.

### 5.4.2 Aplicaciones biológicas y médicas

Hoy en día, existen múltiples aplicaciones para la inspección clínica desde la inspección de enfermedades derivadas del modo de vida hasta los marcadores tumorales, si se incluyen aplicaciones

de investigación. Entre los principios básicos para detectar en vivo, por ejemplo, proteínas diana a menudo se realiza un modelo a partir del mecanismo que permite el reconocimiento de organismos como la reacción antígeno-anticuerpo.

Sin embargo, para que el ser humano discierna la presencia o la ausencia de este reconocimiento, se precisa un nivel mayor de procesamiento. Por ejemplo, el método de detección de alérgenos mediante un método de inspección denominado inmunoensayo ligado a enzimas, en la cual un anticuerpo inmovilizado enlazado al alérgeno se fija a un sustrato y, tras reaccionar con una muestra, se detecta la presencia o ausencia de este alérgeno utilizando un anticuerpo de detección o un marcador de detección. De esta forma, se emplean reacciones en varias fases para indicar los resultados de las pruebas mediante colores o fluorescencia. Este tipo de marcadores se han diseñado para producir eficazmente un color a la menor reacción con el sustrato con lo que, en mediciones de quimioluminiscencia, se logran sensibilidades de detección del orden del pico gramo. Las inspecciones en varias fases, no obstante, plantean problemas al requerir numerosos reactivos y un prolongado tiempo de inspección y al aumentar también el factor de error durante cada fase del tratamiento.

Con estos antecedentes, un grupo de investigación alemán presentó en 2000 la posibilidad de lograr una detección sin marcadores utilizando ondas de THz. Estos investigadores han mostrado en sus experimentos que existen diferencias en el índice de refracción y en la transmitancia del ADN de doble cadena o de cadena simple en la banda de THz. Posteriormente, un grupo de investigación de los Estados Unidos propuso un método para detectar el enlace de avidina y biotina mediante el retardo de fase de la forma de onda temporal THz-TDS. Esto significa que es posible detectar la presencia o ausencia de un enlace sin utilizar marcadores a partir de variaciones en el índice de refracción y la absorbancia de polímeros biológicos con frecuencias de THz. En Japón, utilizando un sistema de medición de imágenes compuesto de un láser de cascada cuántica y una cámara de THz, se fijó una línea de compuestos de pequeñas moléculas en un filtro de membrana y se detectaron con éxito en formato de imágenes proteínas que se enlazaban con ellos, lo que demuestra que es posible detectar sin marcadores sustancias biológicas tales como las proteínas de forma rápida y conveniente.

Por otra parte, se plantea el problema de la sensibilidad de detección como tema importante de desarrollo tecnológico. La sensibilidad de detección necesaria para las inspecciones clínicas es del orden del nanogramo al picogramo y esa sensibilidad, en particular entre el picogramo y el nanogramo, es la que más se necesita en inspecciones sin marcadores. Como ejemplo de aplicación de inspección que requiere esta gran sensibilidad, se puede citar la aplicación en un diagnóstico predictivo para enfermedades autoinmunes derivadas de anticuerpos en la sangre.

En general, la protección ante la invasión desde el exterior de bacterias y de virus se produce mediante la reacción inmune en el interior del organismo. Sin embargo, en el caso de las enfermedades autoinmunes las que atacan el organismo son sustancias implicadas en la inmunidad dentro del cuerpo. Por ejemplo, en la diabetes de tipo 1 se han descubierto anticuerpos especializados en tres tipos de proteínas pancreáticas y se sabe que entre el 70% y el 90% de los pacientes tienen por lo menos uno de estos anticuerpos. Además, se ha investigado la relación entre esos tres anticuerpos y su incidencia y se ha comprobado una relación clara. Por tanto, se puede predecir su aparición mediante inspecciones preliminares para saber si el organismo tiene o no esos anticuerpos, lo que también se pueden utilizar en prevención.

Conviene que esas inspecciones se realicen en los reconocimientos médicos y es importante desarrollar técnicas de inspección convenientes, rápidas y baratas. Cuando se aplique a reconocimientos médicos lo ideal es poder detectar varias enfermedades en una sola inspección y no únicamente para la diabetes de tipo 1 citada anteriormente. En otras palabras, para realizar inspecciones haciendo reaccionar a la vez autoantígenos de varias enfermedades, colocados en una única probeta de inspección con pequeñas cantidades de anticuerpos presentes en la sangre, se precisa

una tecnología que pueda realizar inspecciones sin marcadores y detectar picogramos de sustancias biológicas.

Entre las inspecciones clínicas se prevé que los fármacos de ensayo para inspecciones convencionales de suero inmune, incluidas las inspecciones basadas en la reacción antígeno-anticuerpo, tengan un mercado nacional de 157,2 mil millones de yenes en 2008 y de 168 mil millones en 2013, según una encuesta llevada a cabo en Fuji-Keizai. Este mercado abarca más del 40% del mercado de fármacos de ensayo y ocupa el primer puesto. Cuando se comercialicen, se prevé que la tecnología de inspección de alta precisión y sin marcadores llegue a estos mercados y contribuya a la expansión de los mismos.

Por otra parte, la necesidad de detectar sustancias residuales sin marcadores se da por hecho en diversas situaciones y tienen numerosas aplicaciones en otros ámbitos. Entre ellos figuran la seguridad durante la inspección de gases peligrosos, armas bacteriológicas y explosivos; la inspección de virus infecciosos como nuevos tipos de gripe que puedan provocar pandemias; y la inspección de sustancias en el medioambiente, restos de pesticidas en productos agrícolas y de antibióticos en la ganadería.

Por lo tanto, es importante proseguir el desarrollo de la tecnología de inspección sin marcadores como infraestructura, la investigación relativa a la selectividad de las sustancias de inspección basadas en esta tecnología, y la I+D para mejorar la sensibilidad de detección. Una de las tecnologías para mejorar la sensibilidad de detección de las ondas de THz es un método que utiliza una malla metálica como sensor y que ha dado lugar a tecnologías que permiten la detección de proteínas del orden del nanogramo/mm.

Si se une la tecnología para la detección de sustancias residuales sin marcadores con la tecnología de formación de imágenes, la gama de usos seguirá creciendo. En particular, será posible inspeccionar en su totalidad proteínas, que se unen específicamente a conjuntos de moléculas pequeñas y a conjuntos de cadenas de azúcares, y derivar una tecnología que pueda promover la investigación en materia de fármacos. Además, la detección sin marcadores que utiliza la tecnología de ondas de THz esclarecerá la existencia de proteínas que hasta ahora se han ignorado puesto que no se podían marcar, por lo que se espera que llegue a ser una tecnología de detección importante en materia de investigación científica de la vida.

## **6 Actividades relacionadas con los THz en organizaciones internacionales de normalización**

En 2008 el IEEE 802.15 creó el Grupo de Interés sobre THz (IG THz). Este grupo se centra fundamentalmente en las comunicaciones en THz y en aplicaciones de red conexas que funcionan en bandas de frecuencias de THz entre 275 y 3 000 GHz. Estas aplicaciones de telecomunicaciones incluirían comunicaciones inalámbricas entre componentes, entre circuitos impresos, entre máquinas, de hombre a máquina y entre seres humanos (en interior y exterior). Las aplicaciones de las comunicaciones en THz engloban múltiples categorías con diferentes requisitos. En teoría, las comunicaciones en THz emplearían métodos de modulación inalámbricos de reducida complejidad y sistemas de antenas omnidireccionales o directivas y normalmente tendrían velocidades de transferencia de datos muy elevadas en múltiplos de 10 Gbit/s, y hasta de 100 Gbit/s, en sintonía con la capacidad de las futuras fibras ópticas. Los sistemas inalámbricos en THz podrían considerar distancias de transmisión entre muy pequeñas (algunos centímetros o menos) y relativamente grandes de varios cientos de metros.

El IG THz se ha centrado en los asuntos pendientes relativos al espectro, a la modelización de los canales y a la supervisión de la evolución de la tecnología. Con el desarrollo de tecnologías de transceptores más avanzadas, el grupo 802.15 ha dado un paso adelante hacia la elaboración de una nueva norma al crear una comisión de estudio en julio de 2013 con el mandato de determinar la

validez de una norma sobre 100 G (100 Gbit/s en enlaces inalámbricos punto a punto con conmutación de haces a 40/100 Gbit/s).

La comisión de estudio completó sus trabajos en marzo de 2014 con la creación del Grupo de tareas especiales 3d. Este grupo preparará, a partir de la norma IEEE 802.15.3c, una enmienda que defina una capa física punto a punto conmutada inalámbrica que funcione a velocidades de datos de capa PHY normalmente hasta 100 Gbit/s o más con soluciones alternativas a menores velocidades de datos, si es preciso. Se considera su funcionamiento en bandas entre los 60 GHz hasta las inalámbricas ópticas en distancias tan reducidas como algunos centímetros y hasta varios cientos de metros.

Además se definen modificaciones de la capa de control de acceso al medio (MAC) necesaria para soportar esta nueva capa física. Entre las posibles aplicaciones de interés se encuentran centros de datos inalámbricos, descargas en kioscos, comunicaciones inalámbricas entre dispositivos y conexiones a la red.

Aunque el IG THz inicialmente se ha centrado en la gama de frecuencias por encima de 275 GHz, en el Grupo de tareas especiales 3d la gama de frecuencias se mantiene abierta a otras bandas como la de 60 GHz y la de las comunicaciones ópticas en el espacio libre (FSO). Por lo tanto, las longitudes de onda de interés para la PHY serán de las ondas milimétricas o más cortas.

Un asunto clave a la hora de elaborar una enmienda es la identificación de bandas de frecuencias concretas por encima de 275 GHz. Para seleccionar las bandas de frecuencias apropiadas es fundamental tener en cuenta las características de atenuación de los gases en la gama de frecuencias de 100 GHz a 1 000 GHz como, por ejemplo, las frecuencias de resonancia del oxígeno o del vapor de agua. Una banda continua de interés para las comunicaciones en THz se estima sencillamente evitando las líneas espectrales de resonancia. El Cuadro 8 muestra las gamas de frecuencias adecuadas y la anchura de banda continua.

CUADRO 8

**Gamas de frecuencias adecuadas y anchura de banda continua**

<b>Gama de frecuencias (GHz)</b>	<b>Anchura de banda continua (GHz)</b>	<b>Pérdida adicional por atenuación resonante (dB/km)</b>
200-320	120	< 10
275-320	45	< 10
335-360	25	< 10
275-370	95	< 100
380-445	65	< 100
455-525	70	< 100
625-725	100	< 100
780-910	130	< 100

Además de las características de atenuación hay que tener en cuenta la madurez de la tecnología. Es probable que, a partir de los resultados de experimentos de transmisión y de los proyectos de investigación en curso, el TG 802.15.3d adopte la banda entre 275 GHz y 325 GHz.

Está previsto lanzar una petición de ofertas durante el segundo semestre de 2015 con el fin de completar la norma durante el primer trimestre de 2017. Al mismo tiempo el IG THz sigue supervisando la evolución de las tecnologías pertinentes para ejemplos de utilización diferentes de

los considerados por el TG3d. El resultado final será la creación de una o más comisiones de estudio para la elaboración de normas en la gama de frecuencias de los THz.

## 7 Resumen

Las características de los dispositivos y sistemas en THz abordados en el presente Informe están mejorando con rapidez gracias a los adelantos en las tecnologías de esos dispositivos. Los sistemas de comunicaciones inalámbricas en particular parecen tener grandes perspectivas para transmitir a velocidades cercanas a los 100 Gbit/s, como se está debatiendo en la actualidad en el seno del IEEE802. Para poder introducir estos dispositivos en el mercado en el próximo futuro es preciso tener en cuenta los estudios de compartición entre sistemas pasivos y activos y revisar las disposiciones del RR.

## 8 Bibliografía

- [1] J. Antes *et al.*, High Data Rate Wireless Communication using a 240 GHz Carrier IEEE 802.15-14-0017-00-0thz, Los Angeles, January 2014; <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/14/15-14-0017-00-0thz-high-data-rate-wireless-communication-using-a-240-ghz-carrier.pdf>
  - [2] S. König *et al.*, Wireless sub-THz communication system with high data rate, Nature Photonics 7, 977–981 (2013), <http://www.nature.com/nphoton/journal/vaop/ncurrent/abs/nphoton.2013.275.html>
  - [3] APT/ASTAP/REPT-04 - Technology trends of telecommunications above 100 GHz.
-