

Unión Internacional de Telecomunicaciones

# UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

**Informe UIT-R SM.2352-1**  
(07/2022)

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

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



Unión  
Internacional de  
Telecomunicaciones

## 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 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, 2025

© UIT 2025

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.2352-1

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

(Cuestión UIT-R 237/1)

(2015-2022)

**Cometido**

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

*Página*

1	Introducción.....	3
2	Propiedades, características y aplicaciones típicas de las ondas de THz .....	4
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 .....	5
2.3	Aplicaciones activas típicas de los THz .....	6
3	Información sobre reglamentación .....	7
4	Comunicaciones inalámbricas en THz .....	8
4.1	Posibles ejemplos de utilización de sistemas de comunicaciones en THz .....	8
4.2	Tecnologías de transmisión y recepción en THz .....	15
5	Detección y generación de imágenes.....	20
5.1	Método de generación de señales en THz .....	20
5.2	Cámaras de THz .....	22
5.3	Espectroscopia .....	25
5.4	Pruebas no destructivas.....	26
5.5	Aplicaciones de radar en THz.....	29
6	Detección y comunicación integradas (ISAC) en una red de acceso radioeléctrico .....	33
7	Actividades relacionadas con los THz en organizaciones internacionales de normalización .....	36
8	Resumen .....	36
9	Referencias .....	37

**Abreviaturas y acrónimos**

ATR	Espectrometría de reflexión total atenuada ( <i>attenuated total reflection</i> )
BER	Tasa de errores en los bits ( <i>bit error ratio</i> )
BNA	N-Bencil-2-Metil-4-Mitroanilina ( <i>N-Benzyl-2-Methyl-4-Mitroaniline</i> )
BWO	Oscilador de onda regresiva ( <i>backward-wave oscillator</i> )
CMOS	Semiconductor de óxido metálico complementario ( <i>complementary metal oxide semiconductor</i> )
D2D	Dispositivo a dispositivo ( <i>device-to-device</i> )
DAST	Trifluoruro dietilaminoazufre ( <i>diethylaminosulfur trifluoride</i> )
DFG	Generación de frecuencia diferencia ( <i>difference frequency generation</i> )
EVM	Magnitud del vector de error ( <i>error vector magnitude</i> )
FEL	Laser de electrones libres ( <i>free-electron laser</i> )
FM-CW	Onda continua modulada en frecuencia ( <i>frequency modulated continuous wave</i> )
FTIR	Espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier ( <i>Fourier transform infrared spectroscopy</i> )
GaAs	Arseniuro de galio ( <i>gallium arsenide</i> )
HBT	Transistor bipolar de heterounión ( <i>heterojunction bipolar transistor</i> )
HEMT	Transistor de alta movilidad electrónica ( <i>high electron mobility transistor</i> )
IMPATT	Tiempo de tránsito por avalancha con ionización por choque ( <i>impact ionization avalanche transit-time</i> )
InP	Fosfuro de indio ( <i>indium phosphide</i> )
ISAC	Detección y comunicación integradas ( <i>integrated sensing and communication</i> )
ISAR	Radar de apertura sintética inversa ( <i>inverse synthetic aperture radar</i> )
LFMCW	Onda continua modulada en frecuencia lineal ( <i>linear frequency modulated continuous wave</i> )
LoS	Línea de visión ( <i>line of sight</i> )
LT-GaAs	Arseniuro de galio desarrollado a baja temperatura ( <i>low temperature grown gallium arsenide</i> )
MMIC	Circuito integrado monolítico de microondas ( <i>monolithic microwave integrated circuit</i> )
NDT	Pruebas no destructivas ( <i>non-destructive testing</i> )
NEP	Potencia equivalente de ruido ( <i>noise equivalent power</i> )
NFC	Comunicación de campo cercano ( <i>near field communication</i> )
NLoS	Fuera de la línea de visión ( <i>non line of sight</i> )
QAM	Modulación de amplitud en cuadratura ( <i>quadrature amplitude modulation</i> )
QCL	Laser de cascada cuántica ( <i>quantum cascade laser</i> )
RTD	Diodo túnel resonante ( <i>resonant tunnelling diode</i> )
SAR	Radar de apertura sintética ( <i>synthetic aperture radar</i> )

TDS	Espectroscopia en el dominio del tiempo ( <i>time domain spectroscopy</i> )
THz	Terahercio
TNNNET	Tiempo de tránsito de inyección en túnel ( <i>tunnel injection transit-time</i> )
UTC-PD	Fotodiodo de portadora progresiva única ( <i>uni-traveling-carrier photodiode</i> )
V2V	Vehículo a vehículo ( <i>vehicle-to-vehicle</i> )
WLAN	Red de área local inalámbrica ( <i>wireless local area network</i> )

### Recomendaciones e Informes UIT-R conexos

Recomendación UIT-R P.676 – Atenuación debida a los gases atmosféricos y efectos conexos

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 – Características y aplicaciones de los sistemas fijos inalámbricos en gamas de frecuencias entre 57 GHz y 134 GHz

Informe UIT-R F.2416 – Technical and operational characteristics and applications of the fixed service operating in the frequency band 275-450 GHz

Informe UIT-R M.2417 – Technical and operational characteristics of land mobile service applications in the frequency band 275-450 GHz

Informe UIT-R SM.2450 – Estudios de compartición y compatibilidad entre los servicios móvil terrestre, fijo y pasivos en la gama de frecuencias 275-450 GHz

## 1 Introducción

Las bandas de frecuencias situadas por encima de 275 GHz no están atribuidas a servicios concretos, pero están identificadas para aplicaciones de servicios pasivos, del servicio móvil terrestre y del servicio fijo 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 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) sin que el uso de la gama 275-1 000 GHz por los servicios pasivos impida su uso por servicios activos.

La CMR-19 aprobó la adición al RR del número **5.564A** en el que se identifican las bandas de frecuencias 275-296 GHz, 306-313 GHz, 318-333 GHz y 356-450 GHz para su utilización por las administraciones para la implementación de aplicaciones de los servicios móvil terrestre y fijo donde no sean necesarias condiciones específicas para proteger las aplicaciones del servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasivo) y en el que se indica que las bandas de frecuencias 296-306 GHz, 313-318 GHz y 333-356 GHz sólo pueden ser utilizadas por aplicaciones de los servicios fijo y móvil terrestre cuando se hayan determinado condiciones específicas para garantizar la protección de las aplicaciones del servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasivo) de conformidad con la Resolución **731 (Rev.CMR-19)**.

En 2013 se elaboró y aprobó la Cuestión UIT-R 237/1, «Características técnicas y de funcionamiento de los servicios activos que funcionan en la gama 275-1 000 GHz» 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 gamas de frecuencias de microondas ni milimétricas, estas todavía no se utilizan para el desarrollo de sistemas de comunicaciones inalámbricos de ultra alta velocidad y otros sistemas activos.

Además de los adelantos de las tecnologías en THz, el IEEE creó el Grupo de tareas espaciales IEEE 802.15.3d, que elaboró la norma IEEE 802.15.3d-2017. El Comité Permanente IEEE 802.15 se ocupa hoy en día de identificar y examinar eventuales oportunidades de ampliación de las normas IEEE 802.15 para las comunicaciones en THz.

Este Informe presenta una visión general de las tendencias tecnológicas de los sistemas activos en las gamas de frecuencias superiores a 275 GHz y facilita información técnica y reglamentaria 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.

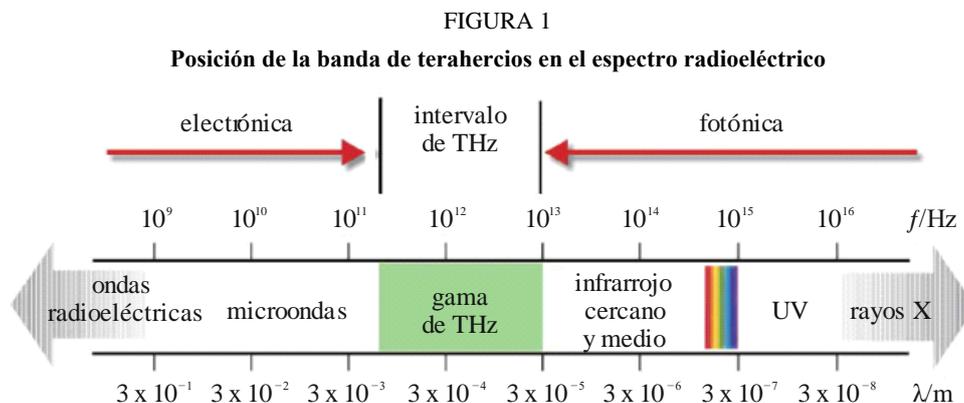
## 2 Propiedades, características y aplicaciones típicas de las ondas de THz

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

#### 2) 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.

#### 3) 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.

#### 4) 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

substancias 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.

**5) 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). La CMR-19 añadió el número **5.564A** del RR para identificar cuatro bandas de frecuencias para el funcionamiento de aplicaciones de los servicios fijo y móvil terrestre. A continuación se muestra los números **5.564A** y **5.565** de la edición de 2020 del RR.

**248-3 000 GHz**

Atribución a los servicios		
Región 1	Región 2	Región 3
...		
<b>275-3 000</b>	(No atribuida) 5.564A 5.565	

**5.564A** Para el funcionamiento de aplicaciones de los servicios fijo y móvil terrestre en bandas de frecuencias de la gama 275-450 GHz:

Las bandas de frecuencias 275-296 GHz, 306-313 GHz, 318-333 GHz y 356-450 GHz están identificadas para su utilización por las administraciones para la implementación de aplicaciones de los servicios móvil terrestre y fijo donde sean necesarias condiciones específicas para proteger las aplicaciones del servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasivo).

Las bandas de frecuencias 296-306 GHz, 313-318 GHz y 333-356 GHz sólo pueden ser utilizadas por aplicaciones de los servicios fijo y móvil terrestre cuando se hayan determinado condiciones específicas para garantizar la protección de las aplicaciones del servicio de exploración de la Tierra por satélite (pasivo) de conformidad con la Resolución **731 (Rev.CMR-19)**.

En aquellas partes de la gama de frecuencias 275-450 GHz en las que se utilizan aplicaciones de radioastronomía pueden ser necesarias condiciones específicas (por ejemplo, distancias de separación mínimas y/o ángulos de evitación mínimos) para garantizar la protección de los emplazamientos de radioastronomía contra las aplicaciones de los servicios móvil terrestre y/o fijo, en función de cada caso, de conformidad con la Resolución **731 (Rev.CMR-19)**.

La utilización de las bandas de frecuencias mencionadas anteriormente por aplicaciones de los servicios móvil terrestre y fijo no impide la utilización de la gama de frecuencias de 275-450 GHz por otras aplicaciones de los servicios de radiocomunicaciones ni establece prioridad alguna entre aplicaciones en esta gama de frecuencias. (CMR-19)

**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 funcionan como enlaces de acceso del último kilómetro. Gracias a la evolución de la tecnología de semiconductores y de las tecnologías de antena avanzadas en la gama de frecuencias de THz en los últimos años, las comunicaciones inalámbricas en THz también se están utilizando en algunos casos para sustituir la fibra óptica cuando las distancias de transmisión son mayores (es decir, varios kilómetros). Organizaciones de investigación y desarrollo 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 entre circuitos integrados y dentro del dispositivo

La Fig. 2 muestra un ejemplo de utilización de comunicaciones entre circuitos integrados y dentro del dispositivo. 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.

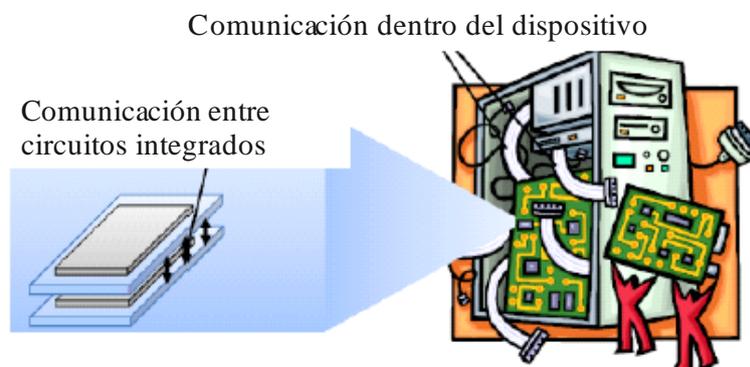
En lo que respecta a la velocidad de transferencia, ya se ha prescrito una velocidad de 10 Gbit/s para USB 3.1 y para PCIExpress 4.0, se ha normalizado una velocidad de transferencia de  $4 \text{ GB/s} = 32 \text{ Gbit/s}$  (en ambos sentidos) para la capa de enlace de datos y, además, se han especificado hasta  $4 \text{ GB/s} \times 64 = 256 \text{ GB/s}$  (2 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 dentro del dispositivo 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 estrecha proximidad 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 entre circuitos integrados y dentro del dispositivo



CUADRO 1

**Requisitos típicos**

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

#### 4.1.2 Sincronización de contenidos con la nube mediante comunicaciones en estrecha proximidad

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

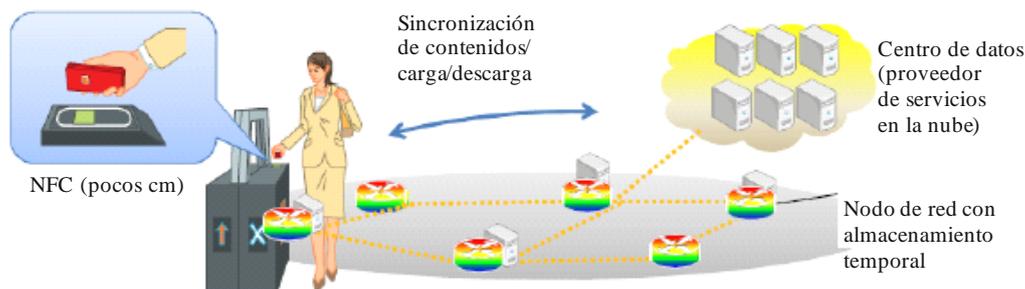
El servicio de almacenamiento es un servicio en la nube que guarda fotos y vídeos de un usuario de teléfono inteligente a través de la red sin que el usuario sea consciente de este proceso de sincronización. Sin embargo, la comunicación por paquetes 3G y LTE que usan los teléfonos inteligentes a menudo 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 estrecha proximidad 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 multitrajecto 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 en estrecha proximidad



Informe SM.2352-3

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 Enlaces inalámbricos entre servidores en un centro de datos**

La Fig. 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 100 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 se considera 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

Enlaces inalámbricos entre servidores en un centro de datos



Informe SM.2352-4

CUADRO 3

**Requisitos típicos**

Distancia de comunicación	Unos pocos cm (proximidad) – 100 m
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.

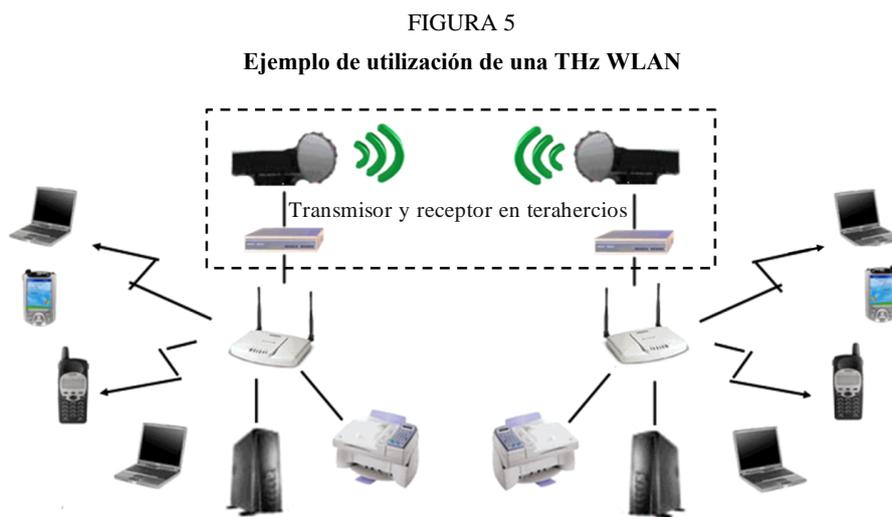
CUADRO 4

**Requisitos típicos**

Distancia de comunicación	100 m a 300 m
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 Fig. 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 y juegos en 3D, entre otros.



Informe SM.2352-5

CUADRO 5

**Requisitos típicos**

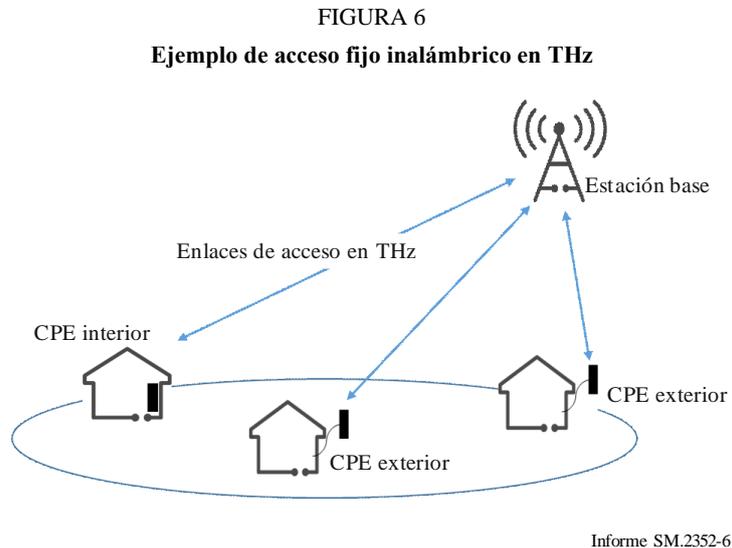
Distancia de comunicación	Unos pocos metros
Velocidad de datos	De pocos Mbit/s a pocas decenas de Mbit/s
Entorno de propagación	Oficinas, aeropuertos, restaurantes
BER requerida	$\leq 1 \times 10^{-6}$

**4.1.6 Acceso fijo inalámbrico en THz**

El acceso fijo inalámbrico (FWA) ofrece un servicio de acceso en banda ancha estable y fiable para clientes particulares o empresas allí donde no hay enlaces de fibra o son muy costosos. Gracias a su bajo coste y rapidez de despliegue, es una solución ampliamente comercializada en todo el mundo. Dado que en los últimos años se ha visto que los servicios de banda ancha domésticos y las aplicaciones de gran ancho de banda cada vez necesitan mayores velocidades de transmisión de datos (iguales o superiores a cientos de Gbit/s), las bandas de frecuencias de terahercios aparecen como una solución atractiva.

En la Fig. 6 se muestra un ejemplo de acceso fijo inalámbrico en THz. Múltiples usuarios se conectan simultáneamente a una estación base a través de un dispositivo *ad hoc*, denominado CPE (equipo en los locales del cliente). La distancia de comunicación puede oscilar entre decenas de metros y varios kilómetros. En algunos casos, a fin de reducir la pérdida por penetración en los materiales de construcción, el CPE se instala en el exterior.

En el Cuadro 6 se presentan los requisitos típicos de este ejemplo. En lo que respecta al entorno de propagación, se examinarán tanto el modelo de visibilidad directa (LoS) el modelo exterior a interior (O2I).



CUADRO 6  
Requisitos típicos

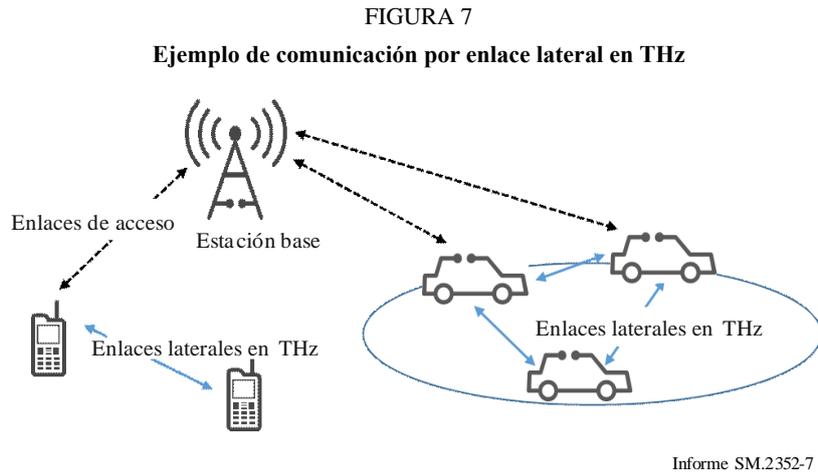
Distancia de comunicación	50 m a 1 000 m
Velocidad de datos	Hasta Tbit/s
Entorno de propagación	Exterior, exterior a interior
BER requerida	$10^{-5}$

#### 4.1.7 Comunicaciones por enlace lateral en THz

En la Fig. 7 se muestra un ejemplo de comunicación por enlace lateral en THz. Un enlace lateral es un enlace de comunicación punto a punto auxiliar que reutiliza las principales características de los enlaces de acceso radioeléctrico y forma parte integrante de la red de acceso radioeléctrico. Permite a los dispositivos móviles comunicarse con dispositivos próximos directamente a distancias cortas o medias. Por consiguiente, se descarga el tráfico de datos de la estación base al tiempo que se reduce el retardo de interacción entre esos dispositivos móviles. Las comunicaciones dispositivo a dispositivo (D2D) y vehículo a vehículo (V2V) son representativas de las comunicaciones por enlace lateral.

En los últimos tiempos han surgido nuevas aplicaciones inalámbricas, como la interacción holográfica y la conducción automatizada o asistida, que imponen más requisitos a los enlaces de comunicación en términos de ancho de banda y latencia de transmisión. En tales casos es conveniente utilizar las comunicaciones por enlace lateral en la gama de frecuencias de THz.

En el Cuadro 7 se presentan los requisitos típicos de este ejemplo. En lo que respecta al entorno de propagación, se ha de considerar la propagación en exteriores y en interiores.



CUADRO 7  
Requisitos típicos

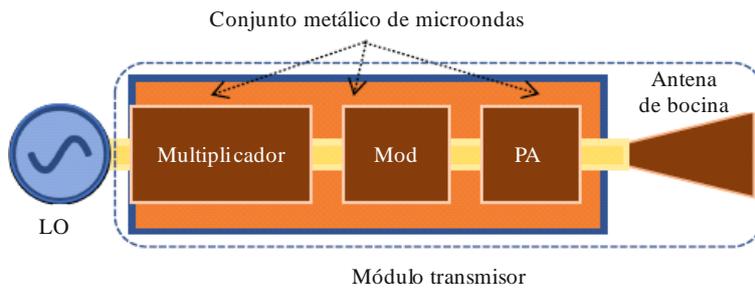
Distancia de comunicación	De unos pocos metros a varias decenas de metros
Velocidad de datos	De unas pocas decenas de Gbit/s hasta Tbit/s
Entorno de propagación	Exterior/interior
BER requerida	No indicada

## 4.2 Tecnologías de transmisión y recepción en THz

### 4.2.1 Módulos transmisores y receptores de 300 GHz mediante MMIC

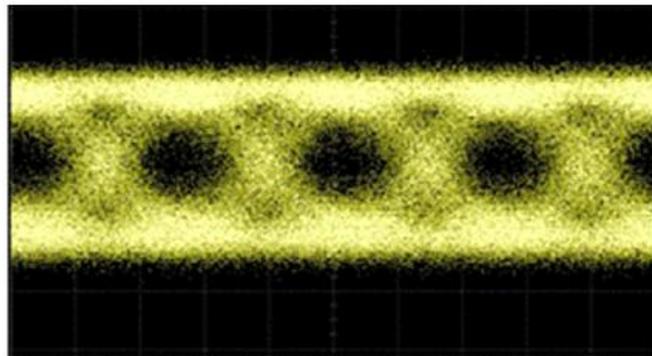
La Fig. 8 muestra un diagrama de bloques de la estructura general de un módulo transmisor. Se montan una antena de bocina, el amplificador de potencia, el modulador y el multiplicador en un conjunto metálico de microondas. El multiplicador multiplica la portadora de 75 GHz generada por el oscilador local 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 Fig. 9 muestra el espectro medido de una señal MDA de 20 Gbit/s (300 GHz) a la salida del amplificador de potencia. Como muestra la Fig. 10, se observa una señal moduladora con una frecuencia central de 300 GHz  $\pm$ 20 GHz en el espectro de salida del modulador.

FIGURA 8  
**Diagrama de bloques del módulo transmisor**



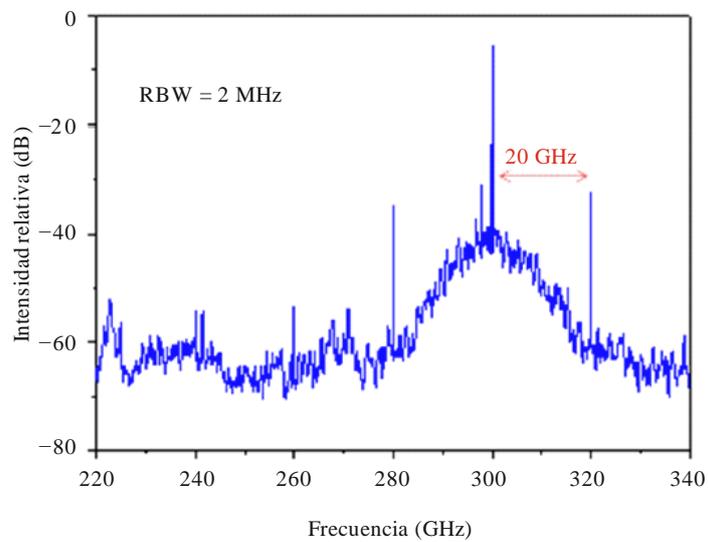
Informe SM.2352-8

FIGURA 9  
**Diagrama de la señal de 20 Gbit/s del módulo transmisor**



Informe SM.2352-9

FIGURA 10  
**Espectro a la salida del amplificador de potencia**



Informe SM.2352-10

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 de los transmisores y receptores integrados, 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 Transmisor y receptor integrado CMOS en la banda de 300 GHz

Dado que la frecuencia de oscilación máxima de los dispositivos CMOS (semiconductor de óxido metálico complementario) está limitada a unos 300 GHz, puede resultar difícil fabricar amplificadores CMOS que funcionen en bandas de frecuencias superiores a 300 GHz. Se propone una arquitectura de circuito integrado sin amplificadores CMOS para un transmisor y receptor integrados de 300 GHz, diseñado y fabricado utilizando un procesador CMOS de 40 nm y cuya evaluación es experimental. En la Fig. 11 se muestran las características de frecuencia de la potencia de salida del transmisor de un circuito integrado CMOS, ilustrado en la Fig. 12(a), y el factor de ruido y la ganancia de conversión del receptor de un circuito integrado CMOS, ilustrado en la Fig. 12(b). El ancho de banda de 3 dB en 20 GHz de la potencia de salida del transmisor en la gama de frecuencias 250-280 GHz se consigue gracias al circuito integrado CMOS. Se consiguen factores de ruido del receptor inferiores a 28 dB sin amplificadores de bajo ruido en la gama de frecuencias 240-290 GHz. El transmisor y receptor está formado por circuitos de conversión de frecuencias, como mezcladores, duplicadores, triplicadores y moduladores en cuadratura. En las Figs. 13(a) y 13(b) se muestran respectivamente el espectro de la señal 16-QAM cuya velocidad de datos es de 80 Gbit/s y la constelación inferior al 12% rms e EVM (magnitud del vector de error). La potencia de salida del transmisor y el factor de ruido del receptor pueden mejorarse conectando, respectivamente, amplificadores de alta potencia y de bajo ruido, hechos con compuestos semiconductores de tipo III-VI, por ejemplo, GaAs (arseniuro de galio) y InP (fosfuro de indio).

FIGURA 11

Potencia de salida, factor de ruido y ganancia de conversión del transmisor y receptor CMOS

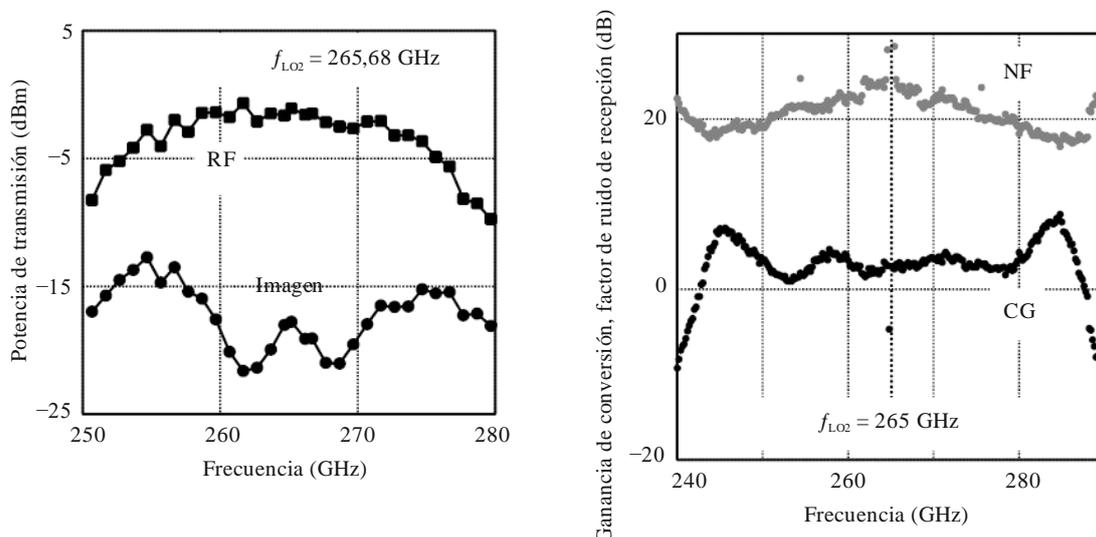
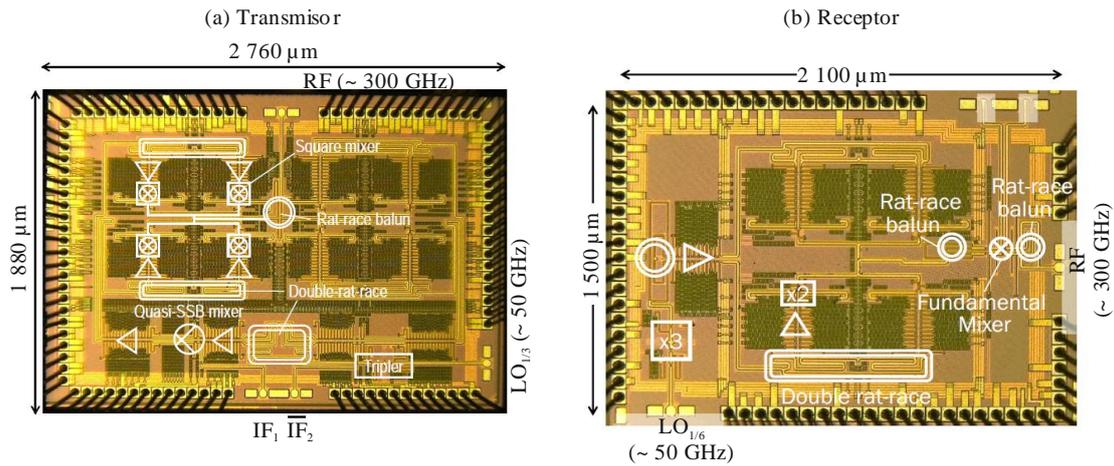


FIGURA 12

## Fotografías de los circuitos integrados del transmisor y receptor CMOS

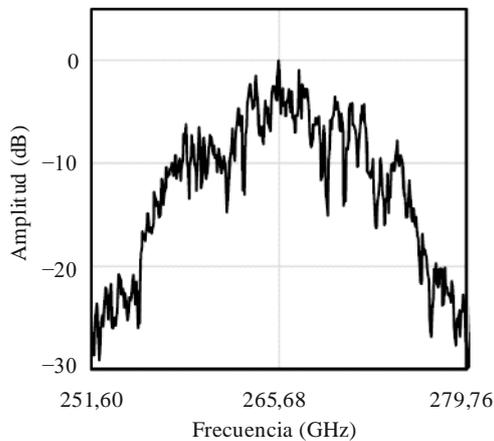


Informe SM.2352-12

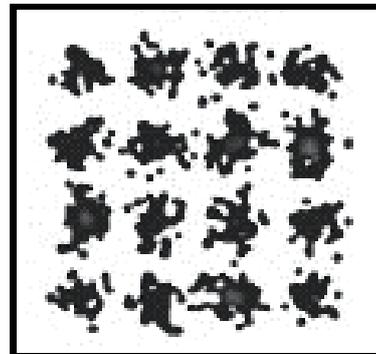
FIGURA 13

## Calidad de funcionamiento de los circuitos integrados de transmisor y receptor CMOS

(a) Espectro de las señales 16-QAM



(b) Constelación de señales de 16-QAM



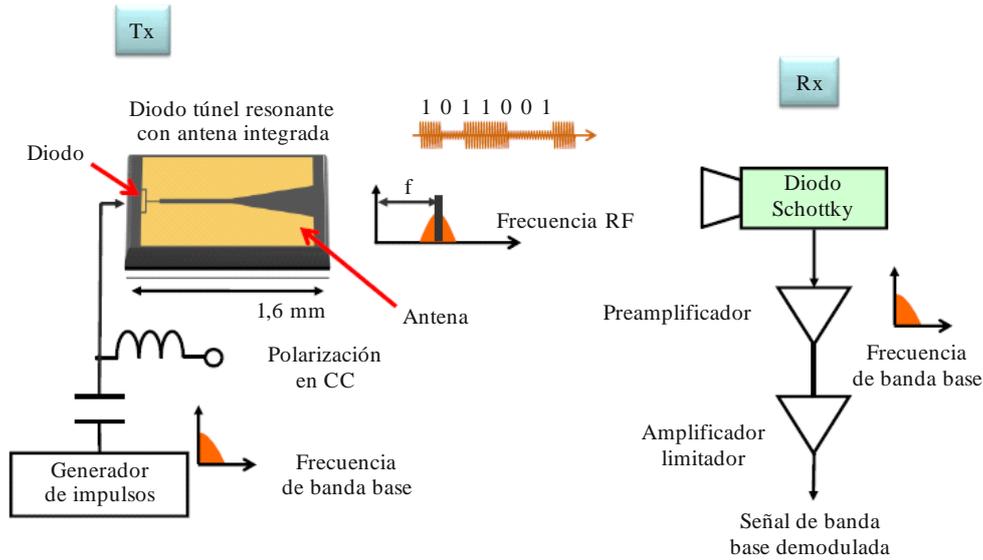
Informe SM.2352-13

## 4.2.3 Transmisor y receptor integrado 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. 14. 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 14

Diagrama de bloques del enlace inalámbrico con tecnologías diodo



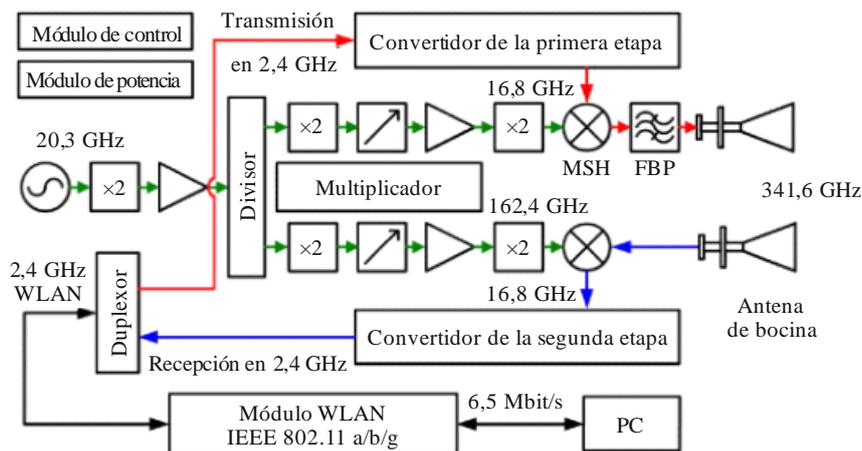
Informe SM.2352-14

#### 4.2.4 WLAN de 0,34 THz basada en IEEE 802.11

La Fig. 15 muestra el esquema de una WLAN en 0,34 THz que se ha realizado mediante un extremo transmisor y receptor integrado de comunicación inalámbrica basado en semiconductores de estado sólido y un dispositivo WLAN basado en la norma IEEE 802.11. 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 IEEE 802.11 que funciona a una velocidad de 150 Mbit/s en 2,4 GHz. La portadora de 2,4 GHz basada en IEEE 802.11 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 receptor de la WLAN de 0,34 THz que la convierte en 0,34 THz y la transmite por la antena. Si el extremo receptor de 0,34 THz recibe la señal, la convierte en 2,4 GHz y la envía al dispositivo inalámbrico IEEE 802.11.

FIGURA 15

Representación esquemática del nodo WLAN de 0,34 THz

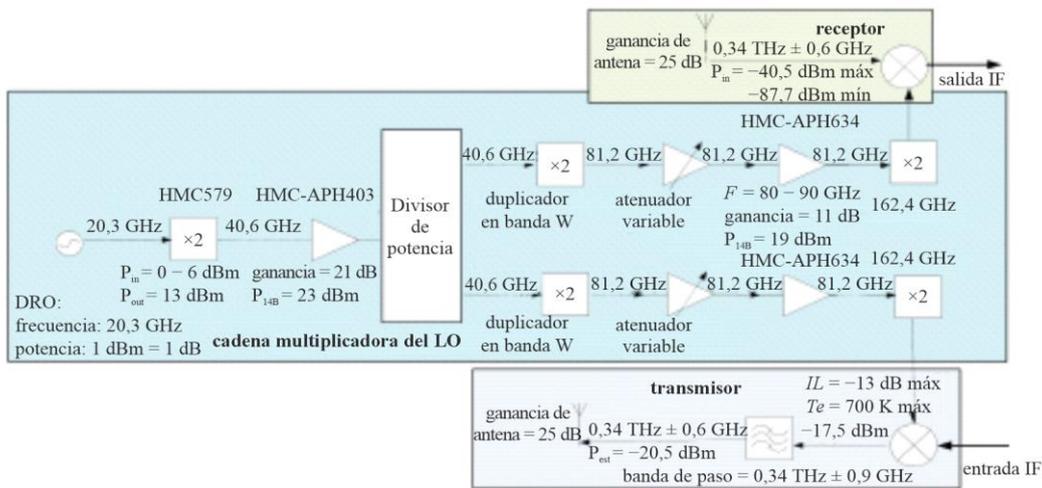


Informe SM.2352-15

La Fig. 16 muestra la estructura de la etapa de entrada del transmisor y receptor integrado 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 transmisor y receptor integrado; 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 16

Etapa de entrada del transmisor y receptor integrado WLAN de 0,34 THz



Informe SM.2352-16

## 5 Detección y generación de imágenes

Las ondas de THz tienen cierta capacidad de penetración en substancias 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 8 presenta la relación entre los métodos de generación de señales en THz y sus tecnologías.

## CUADRO 8

## Métodos de generación de THz y sus tecnologías

Método de generación	Tecnología empleada	Material	Función
Excitación fotónica de impulso ultracorto	Antena fotoconductor	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, pHEMT	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 fotoconductor (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 impulso ultracorto, se puede obtener un impulso 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 impulso 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 impulso 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 (TNNETT) 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 Fig. 17 muestra una imagen de una cámara infrarroja con un sensor con  $320 \times 240$  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 un dígito (Fig. 18(a)) la sensibilidad a 3 THz aproximadamente. Además, se ha desarrollado el sensor de THz de banda estrecha que se muestra en la Fig. 18(b) con el fin de mejorar la sensibilidad entre dos y cuatro veces solo para determinadas longitudes de onda.

La Fig. 19 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 Fig. 20 y el Cuadro 9 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 17

a) Sensor de THz de banda ancha; b) Sensor de THz de banda estrecha

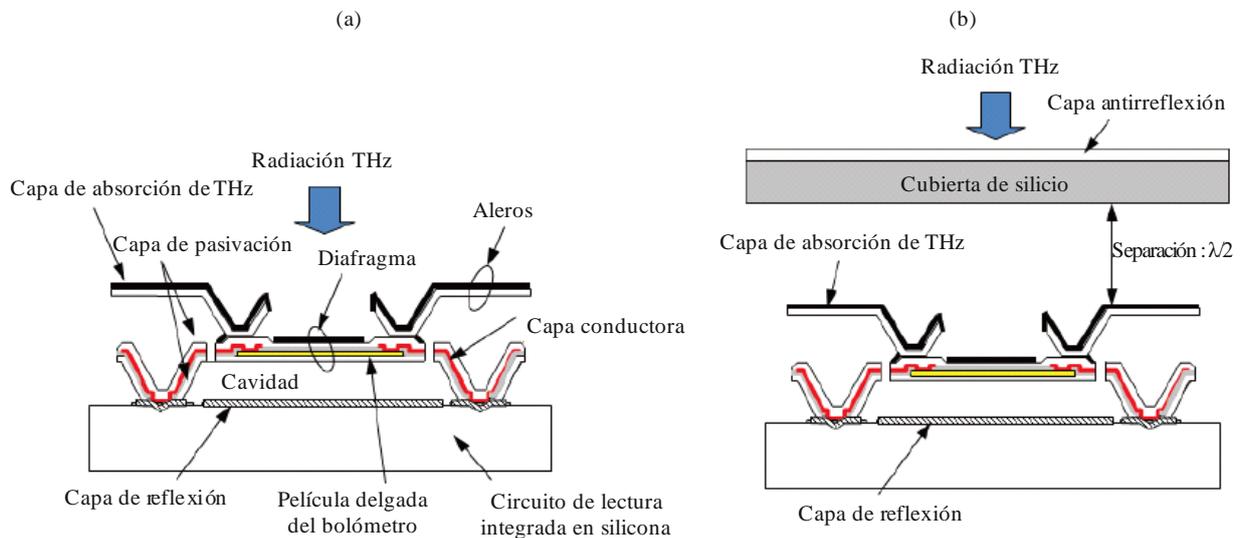
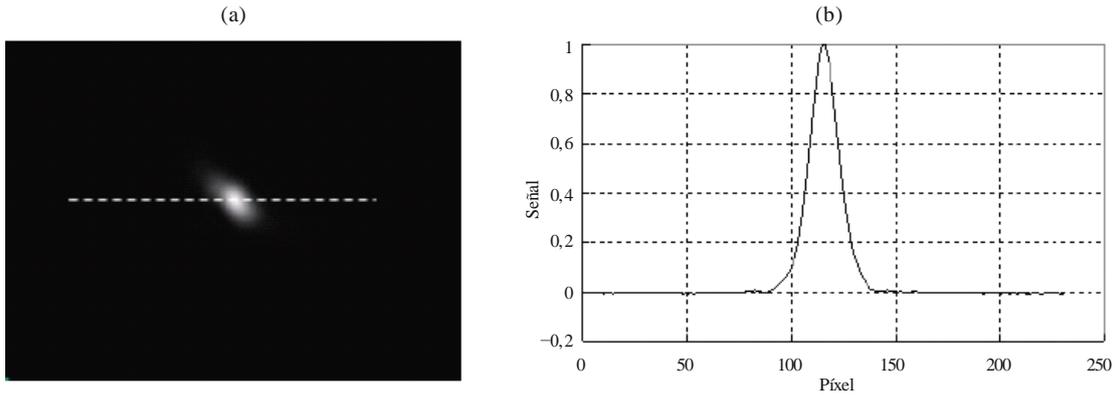


FIGURA 18

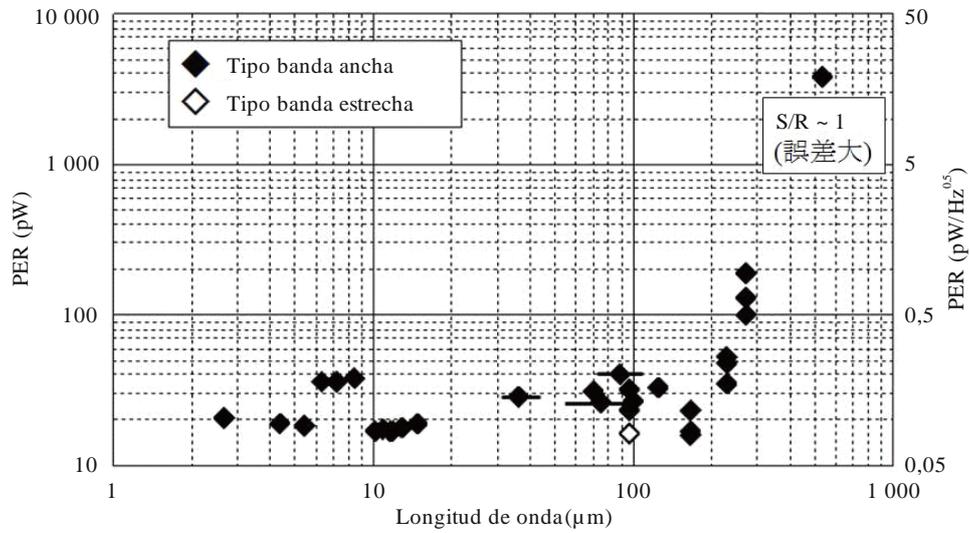
Diagrama del haz QCL de un sensor de THz con  $320 \times 240$  píxeles de  $23,5 \mu\text{m}$



Informe SM.2352-18

FIGURA 19

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



Informe SM.2352-19

FIGURA 20

Imagen de una cámara de THz



Informe SM.2352-20

## CUADRO 9

**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: USB 2.0 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 substrato 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 substrato 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 de América 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 investigación y el desarrollo 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.

#### **5.4.3 Sistema NDT basado en un sistema de generación de imágenes LFMCW multibanda sintético**

El sistema NDT en THz también utiliza una señal FMCW. Se ha diseñado un sistema de generación de imágenes LFMCW multibanda sintético. Para ampliar el ancho de banda del sistema y mejorar la resolución, se empalman y sintetizan sistemas de generación de imágenes que utilizan distintas bandas de frecuencias. El sistema recurre a la «multiplexación por división en el tiempo» para completar el barrido de frecuencias de múltiples canales e introduce los datos de las frecuencias intermedias de los distintos canales para completar el ancho de banda sintético. Se diseña y crea también un sistema de enfoque cuasi óptico con apertura compartida. Se alinean los puntos de observación de los múltiples canales y, por último, se verifica la efectividad del sistema sintético en 110-500 GHz con experimentos de generación de imágenes tridimensionales. Así, la generación de imágenes en THz se ha ido convirtiendo en un nuevo método suplementario de prueba no destructiva.

## 5.5 Aplicaciones de radar en THz

En comparación con las microondas, la onda de THz tiene un ancho de impulso más estrecho, un tamaño de antena menor, un ancho de haz más estrecho y una mejor directividad, lo que hace que los radares en THz puedan detectar objetivos más pequeños y lograr un posicionamiento más preciso que los radares de microondas. Además, gracias a que pueden ver a través de los materiales, los radares en THz pueden detectar objetos ocultos por una cubierta o por humo.

### 5.5.1 Generación de imágenes activa por radar

La generación de imágenes activa por radar en THz puede implementarse principalmente utilizando métodos SAR/ISAR.

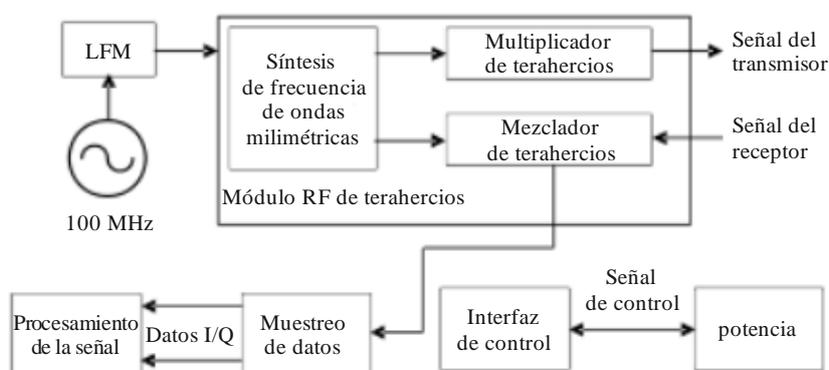
La generación de imágenes por radar de apertura sintética (SAR) es una tecnología de generación de imágenes que no está limitada por la apertura óptica del objetivo detectado. En función de si el radar está o no en movimiento, la generación de imágenes puede dividirse en generación de imágenes SAR y generación de imágenes por radar de apertura sintética inversa (ISAR). Gracias a la utilización de un ancho de banda ultraamplio, un ancho de impulso ultraestrecho y la mejor directividad de las ondas de THz, los radares SAR e ISAR de THz pueden lograr una resolución de imagen mucho más alta que los radares de microondas tradicionales.

En función del método utilizado para generar las ondas de THz, los radares de generación de imágenes en THz pueden dividirse en electrónicos y fotónicos. La dificultad que reviste la implementación de los radares fotónicos hace que los radares de generación de imágenes en THz se basen principalmente en el método electrónico. En esta sección se describen los radares de generación de imágenes en THz electrónicos.

Los radares de generación de imágenes en THz suelen estar compuestos de sintetizadores de frecuencia, multiplicadores, mezcladores, amplificadores de bajo ruido (LNA), unidades de muestreo de datos y unidades de procesamiento de la señal, entre otras cosas. En comparación con los radares por impulsos tradicionales, limitados por el nivel de potencia corriente de la fuente de la señal en THz, la mayoría de los radares de generación de imágenes en THz utilizan formas de onda de onda continua modulada en frecuencia (FMCW). En la Fig. 21 [5] se muestra un diagrama de bloques típico de los radares de generación de imágenes en THz.

FIGURA 21

Diagrama de bloques típico de los radares de generación de imágenes en THz



Informe SM.2352-21

En los últimos 10 o 20 años muchos institutos y universidades de todo el mundo han desarrollado diversos radares de generación de imágenes en THz, la mayoría de los cuales están aún en fase experimental o de prototipo, aunque otros están cerca de poder utilizarse en la realidad.

En el Cuadro 10 se resumen las principales características de varios sistemas de radar de generación de imágenes en THz.

CUADRO 10

**Características de varios sistemas de radar de generación de imágenes en THz**

	<b>Sistema A [6]</b>	<b>Sistema B [6]</b>	<b>Sistema C [6]</b>	<b>Sistema D [6][7]</b>
Frecuencia operativa (GHz)	330	670	670	300
Ancho de banda (GHz)	6,4	28,8	28,8	44
Potencia de salida (mW)	10	0,5	1,2	1
Modo de modulación	FMCW	FMCW	FMCW	FMCW
Modo de detección	Barrido de haz	Barrido de haz	ISAR	ISAR
Distancia operativa (metros)	20	25	2-8	700 (cuerpo humano)
Resolución (cm)	1	1	1,3	0,37
Año	2010	2011	2013	2015

Se prevé que los radares de generación de imágenes en THz experimenten grandes progresos y estén operacionales a lo largo de la próxima década a medida que vaya mejorando la calidad de funcionamiento de los dispositivos de terahercios y madure el diseño de los sistemas.

### 5.5.2 Inspección de seguridad sin contacto

Los radares en THz pueden utilizarse para la inspección de seguridad sin contacto. Gracias a su capacidad para penetrar la ropa, el cartón y otros materiales no polarizados conservando una alta resolución, los radares en THz pueden obtener imágenes en perspectiva de alta resolución de mercancías peligrosas ocultas. La distancia de detección oscila entre los 20 y los 100 metros [8], lo que permite emitir alertas tempranas antes de alcanzar el radio de ataque de las mercancías peligrosas. Además, la energía fotónica en terahercios es baja, muy inferior a la energía ionizante de la piel humana, lo que puede eliminar el miedo a los daños generados por la radiación.

### 5.5.3 Sistema de escáner de paso

La investigación en el ámbito de los sistemas de escáner de paso con alto caudal y calidad de detección, se centra no sólo en la detección de amenazas metálicas y no metálicas, sino también en la evitación de largas colas de pasajeros en los controles de seguridad de los aeropuertos. En la Fig. 22(a) se ilustra esquemáticamente un sistema de escáner de paso formado por dos paneles que permiten ver simultáneamente ambos lados de una persona. En la Fig. 22(b) se muestra el diagrama de bloques del transmisor y receptor integrado que funciona como un radar FM-CW con una alta relación señal/ruido [9]. La resolución de los sistemas de escáner que utilizan radares FW-CW depende del ancho de banda de las frecuencias portadoras. De acuerdo con el Reglamento de Radiocomunicaciones, las bandas de frecuencias que ofrecen un ancho de banda contiguo superior a 8 GHz atribuidas a título primario al servicio de radiolocalización son las siguientes:

- ancho de banda de 8 GHz: 92-94 GHz, 94-94,1 GHz, 94,1-95 GHz y 95-100 GHz;
- ancho de banda de 12,5 GHz: 136-141 GHz y 141-148,5 GHz;
- ancho de banda de 10 GHz: 238-240 GHz, 240-241 GHz y 241-248 GHz.

Aunque la reglamentación en vigor contempla un ancho de banda contiguo máximo de 12,5 GHz, la resolución inferior a 5 mm necesaria para el sistema de escáner no puede conseguirse en las bandas de frecuencias inferiores a 275 GHz. En el Cuadro 11 se resumen las demás especificaciones de los sistemas de escáner de paso. La utilización de las frecuencias de THz hace que la ropa pueda influir en la calidad de funcionamiento del sistema, por lo que se han de examinar detenidamente parámetros específicos, como la potencia de salida y el tipo de antena de los sistemas de escáner de paso teniendo en cuenta las características de atenuación y recepción de los materiales de que está hecha la ropa en la gama de frecuencias de funcionamiento 275-600 GHz. En la Fig. 23 se muestra la relación entre las posibles gamas de frecuencias de funcionamiento de los sistemas de escáner de paso y la atenuación por absorción de los gases atmosféricos. Se propone utilizar en las bandas 1, 2, 3 y 4, respectivamente las frecuencias centrales 325 GHz, 380 GHz, 447 GHz y 555 GHz<sup>1</sup> para evitar causar interferencia perjudicial a las aplicaciones de servicios pasivos que funcionan en las mismas bandas de frecuencias o en bandas de frecuencias adyacentes.

En publicaciones ajenas a la UIT pueden encontrarse las propiedades de transmisión, las mediciones de absorción y el índice de refracción de diversos materiales en la gama de terahercios [10]-[15]. Se indica ahí que la ropa es transparente en las condiciones de frecuencias operativas, grosor y densidad de los materiales y periodicidad de los patrones de tejido y que la transmitancia de algunos materiales suele pasar de transparente a opaca a medida que aumenta la frecuencia. Los metales, así como el material de contrabando oculto en tejidos, podrán ser discernibles si su reflectividad es superior a la de los tejidos en la gama de frecuencias 0,1-1 THz.

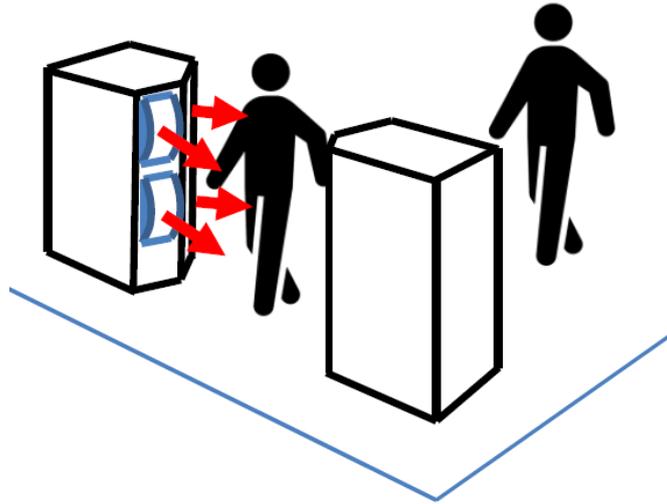
---

<sup>1</sup> Cabe señalar que todas las gamas de frecuencias propuestas para los sistemas de escáner de paso se solapan con las bandas de frecuencias identificadas para su utilización por aplicaciones de servicios pasivos (véase el número **5.565** del RR). Es necesario realizar análisis adicionales para determinar qué se puede hacer para proteger esos servicios pasivos contra la interferencia perjudicial.

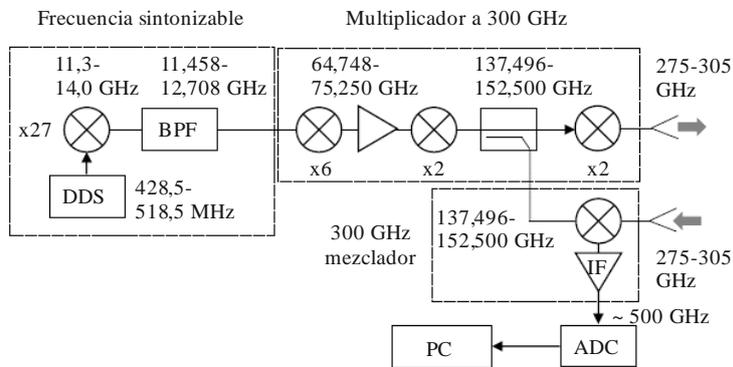
FIGURA 22

**Concepto de sistema de escáner de paso en THz**

(a) Ilustración esquemática de un sistema de escáner de paso en THz



(b) Diagrama de bloques del sistema de escáner de paso en THz



Informe SM.2352-22

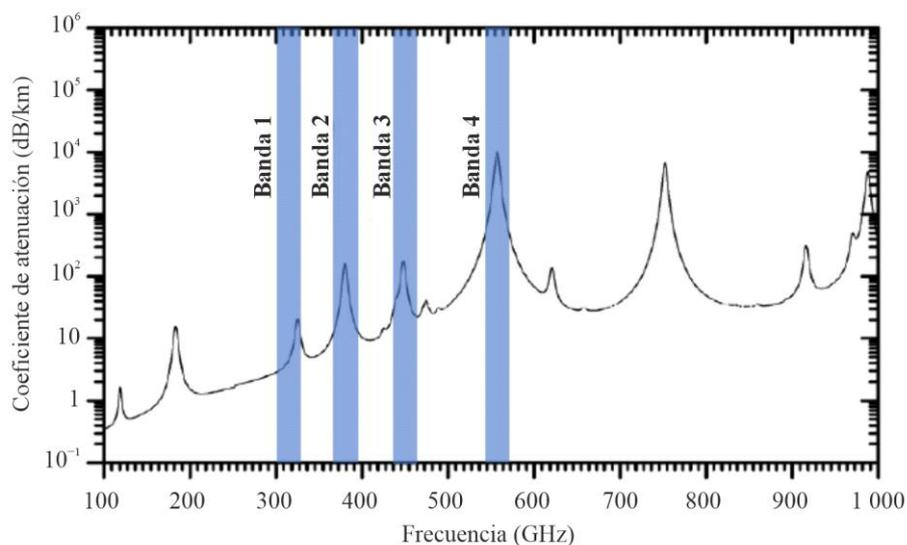
CUADRO 11

**Especificaciones de los sistemas de escáner de paso**

Parámetros	Valores
Frecuencia central (GHz)	325, 380, 447, 555
Potencia de salida a 325 GHz (mW)	> 10
Diagrama de antena	Gaussiano
Tipo de antena	Bocina
Ancho de banda de frecuencia (GHz)	30
Resolución de alcance (mm)	5
Distancia de detección máxima (m)	3
Velocidad peatonal (km/h)	2-4
Número de radares	8-16
Materiales ocultos detectables	Metal, cerámica, explosivos, líquidos combustibles

FIGURA 23

Posible gama de frecuencias operativa para sistemas de escáner de paso



Informe SM.2352-23

## 6 Detección y comunicación integradas (ISAC) en una red de acceso radioeléctrico

Las redes de acceso radioeléctrico (RAN) se diseñaron en un principio para la comunicación entre estaciones base y equipos de usuario. Al crecer rápidamente la demanda de aplicaciones basadas en la ubicación, por ejemplo, publicidad en función de la ubicación del terminal, los sistemas RAN existentes disponen de una capacidad de posicionamiento si pueden utilizar señales de referencia del sistema para detectar el entorno circundante, lo que puede considerarse como un intento de integrar la detección en un sistema de comunicaciones.

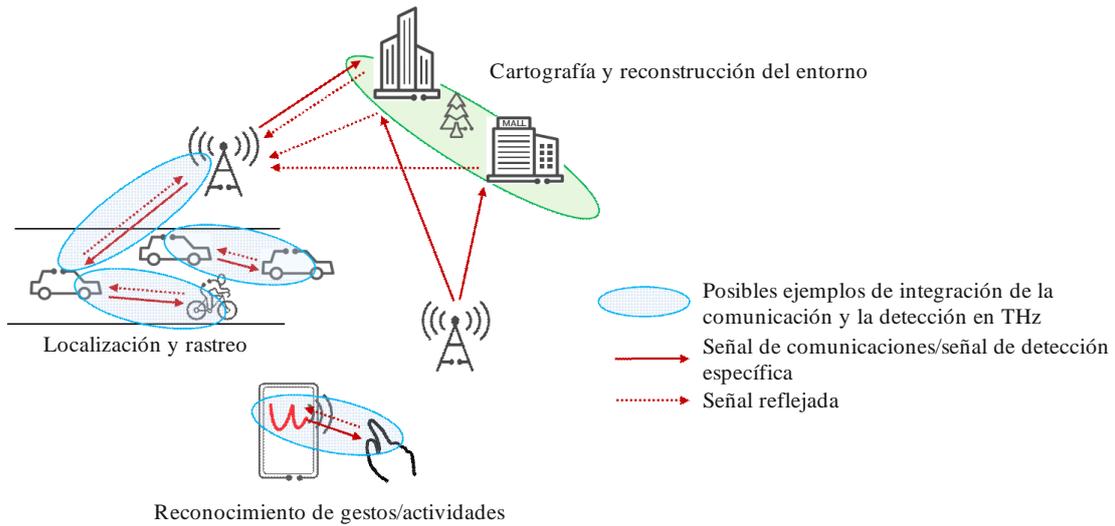
Se prevé que en el futuro las RAN utilicen bandas de frecuencias más altas, incluidas las bandas de THz, donde hay una gran cantidad de espectro disponible. De este modo las RAN tendrán mayores capacidades de transmisión y su capacidad de detección será comparable a la de los sistemas de radiolocalización típicos. Se está estudiando la integración de la detección y la comunicación en las redes de acceso radioeléctrico [16]-[19].

En la Fig. 24 se muestra un ejemplo de detección y comunicación integradas en una red de acceso radioeléctrico donde los enlaces adaptados para utilizar las bandas de frecuencias de THz se marcan con círculos azules. Tanto las estaciones base como los dispositivos terminales pueden extraer información sobre los objetos de interés en el entorno circundante a partir de las señales RF recibidas, por ejemplo, existencia, distancia, velocidad, forma y orientación. Esta información puede utilizarse para servicios como la localización y el rastreo, la cartografía y reconstrucción del entorno, así como el reconocimiento de gestos/actividades, entre otras cosas. Además, también puede utilizarse para mejorar la calidad de funcionamiento de los servicios de comunicación. La fuente de las señales RF pueden ser señales de comunicación o señales de detección específicas.

Desde el punto de vista del espectro, el sistema codiseñado para la detección y la comunicación simultáneas permitirá utilizar más eficazmente el espectro.

FIGURA 24

## Ejemplo de detección y comunicación integradas en THz en una red de acceso radioeléctrico



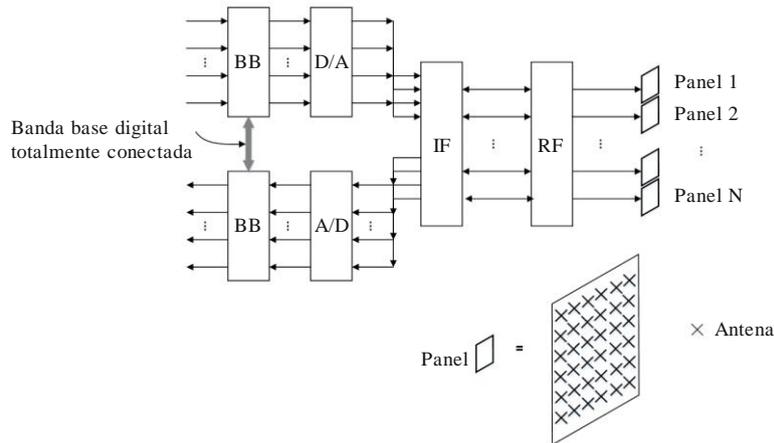
Informe SM.2352-24

En la Fig. 25 se muestra la estructura de implementación de un sistema de detección y comunicación integradas en THz, incluido el panel de antena, el extremo frontal de radiofrecuencias (RF), el circuito de frecuencia intermedia (IF), el muestreador analógico-digital (AD)/DA y la unidad de procesamiento en banda base. Las unidades de banda base del transmisor y el receptor están conectadas una red en bucle digital a fin de procesar conjuntamente las señales de detección transmitidas y recibidas. Un canal RF puede regir uno o varios paneles de antena con varios elementos de antena.

Sobre la base de esta estructura, en la Fig. 26 se muestra la implementación del extremo frontal de RF con cuatro transmisores y 16 receptores (4T16R) para un sistema de detección y comunicación integradas. Concretamente, se compone de un conjunto de circuitos integrados de transmisión y cuatro conjuntos de circuitos integrados de recepción. Como se muestra en la Fig. 26(a), en cada conjunto de circuitos integrados cuatro canales comparten un convertidor ascendente o descendente para la transmisión o recepción y cada canal tiene un desplazador de fase independiente; a continuación el amplificador con control de ganancia se conecta al panel de antena con sólo un elemento. Las señales transmitidas y recibidas comparten un sistema oscilador local (LO).

FIGURA 25

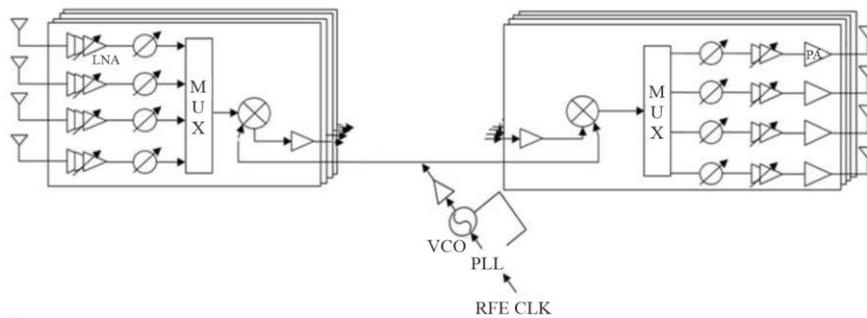
Estructura de implementación de un transmisor y receptor de detección y comunicación integradas en THz



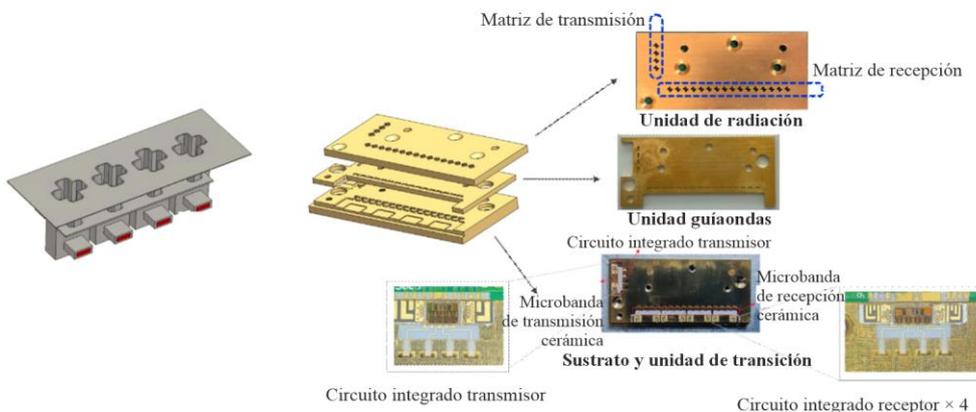
Informe SM.2352-25

FIGURA 26

Circuito integrado del frontal RF con cuatro transmisores y 16 receptores (4T16R) para un transmisor y receptor de detección y comunicación integradas en THz. (a) estructura de implementación del circuito integrado del frontal del transmisor/receptor, (b) imagen del módulo frontal 4T16R



(a)



(b)

Informe SM.2352-26

En función de los requisitos de sistema de las frecuencias operativas, la implementación del circuito integrado deberá escoger el proceso semiconductor más conveniente. Por ejemplo, la frecuencia de corte de los transistores de silicio-germanio (SiGe) hace que suelen utilizarse esos circuitos integrados

en las bandas de frecuencias por debajo de 300 GHz [20], mientras que se recurre a transistores de fosforo de indio (InP) para las frecuencias hasta 600 GHz [21] dada la mejor movilidad de los electrones. Además, para mejorar la potencia de salida del transmisor y la sensibilidad del receptor también se recurre a la integración heterogénea de compuestos semiconductores de tipo III-V, como el nitruro de galio (GaN) y el InP.

## **7 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 transmisor y receptor integrado más avanzadas, el grupo 802.15 dio un paso adelante hacia la elaboración de la primera norma inalámbrica a 300 GHz al crear el Grupo Especial 3d en 2014, que completó sus trabajos en octubre de 2017, fecha de publicación de la norma IEEE 802.15.3d-2017 enmendada. Esa enmienda se basa en la norma IEEE 802.15.3c y define en IEEE 802.15.3-2016 una capa física punto a punto conmutada inalámbrica que funciona a velocidades de datos de capa PHY normalmente hasta 100 Gbit/s. Se considera su funcionamiento en la banda 252-321 GHz en distancias tan reducidas como algunos centímetros y hasta varios cientos de metros. La norma IEEE 802.15.3d-2017 se elaboró en paralelo a la norma IEEE 802.15.3e-2017, que se considera una enmienda para las comunicaciones a alta velocidad y estrecha proximidad (HRCP) a 60 GHz. En ambas enmiendas son idénticas grandes partes de la capa MAC, además de los esquemas de modulación y codificación.

Entre las posibles aplicaciones de interés se encuentran centros de datos inalámbricos, descargas en kioscos, comunicaciones inalámbricas entre dispositivos y conexiones a la red.

El Comité Permanente de THz, que sustituyó al IG THz en 2018, está estudiando la posibilidad de preparar otras enmiendas para la gama de frecuencias de THz.

## **8 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 IEEE 802. 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.

## 9 Referencias

- [1] J. Antes *et al.*, High Data Rate Wireless Communication using a 240 GHz Carrier IEEE 802.15-14-0017-00-0thz, Los Angeles, enero de 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] M. Fujishima, 300-GHz-band CMOS transceiver for ultrahigh-speed terahertz communication, Proc. SPIE, Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XII (2019)
  - [4] APT/ASTAP/REPT-04 – Technology trends of telecommunications above 100 GHz
  - [5] WU Fu-Wei *et al.*, A 220GHz terahertz Synthetic Aperture Radar, Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, Vol. 15, N.º 3, junio de 2017
  - [6] D.S. li *et al.*, Research Progress of THz Imaging Radar System, Journal of Microwaves, Vol. 31, N.º 6, diciembre de 2015
  - [7] H.Q. Wang *et al.*, Review of Terahertz Radar Technology, Journal of Radars, Vol. 7, N.º 1, febrero de 2018
  - [8] X.B. Yang *et al.*, Terahertz Band Radar, National Defense Industry Press (China), diciembre de 2017
  - [9] C. Otani *et al.*, Development of MMW-to-THz Radar Imaging Technology and Systems, 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT), septiembre de 2020
  - [10] D.T. Petkie, *et al.*, «Active and passive millimeter and sub-millimeter-wave imaging», in Proc. SPIE, 2005, Vol. 5989, págs. 598918-1 – 598918-8
  - [11] A.J. Gatesman, *et al.*, «Terahertz behaviour of optical components and common materials», in Proc. SPIE, 2006, Vol. 6212, págs. 62120-E1 – 62120-E12
  - [12] M.C. Kemp, «Millimetre wave and terahertz technology for the detection of concealed threats: a review», in Proc. SPIE, 2006, Vol. 6402, págs. 64020D-1-64020D-19
  - [13] R. Appleby and H. B. Wallace, «Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region», IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 55, N.º 11, págs. 2944-2956, noviembre de 2007
  - [14] R.E. Miles, X.-C. Zhang, H. Eisele, and A. Krotkus, (Editors), «Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects», in NATO Science for Peace and Security Series – B: Physics and Biophysics, Springer, 2007, págs. 225-240
  - [15] P.F. Goldsmith, *et al.*, «Focal plane imaging systems for millimeter wavelengths», IEEE Trans. Microwave Theory Techniques., Vol. 41, N.º 10, págs. 1664-1675, octubre de 1993
  - [16] C. Lima *et al.*, Convergent communication, sensing and localization in 6G systems: an overview of technologies, opportunities and challenges, IEEE Access, Vol. 9, junio de 2021
  - [17] M. Rahman *et al.*, Framework for a perceptive mobile network using joint communication and radar sensing, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 56, N.º 3, junio de 2020
  - [18] W. Tong, P. Zhu, *et al.*, 6G: The Next Horizon: From Connected People and Things to Connected Intelligence. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
  - [19] Oupeng Li, Jia He, Kun Zeng, Ziming Yu, Xianfeng Du, *et al.*, «Integrated Sensing and Communication in 6G A Prototype of High Resolution THz Sensing on Portable Device», in 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), 2021, págs. 544-549
  - [20] X. Deng, Y. Li, J. Li, C. Liu, W. Wu and Y. Xiong, «A 320-GHz 1x4 Fully Integrated Phased Array Transmitter Using 0.13 um SiGe BiCMOS Technology», IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, Vol. 5, N.º 6, págs. 930-940, noviembre de 2015
  - [21] W.R. Deal *et al.*, «A Low-Power 670-GHz InP HEMT Receiver», IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, Vol. 6, N.º 6, págs. 862-864, noviembre de 2016
-