

Unión Internacional de Telecomunicaciones

**UIT-R**

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

**Informe UIT-R SM.2392-0**  
(08/2016)

# **Aplicaciones de la transmisión inalámbrica de potencia por haces radioeléctricos**

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

### Series de los Informes UIT-R

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

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

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

Publicación electrónica  
Ginebra, 2016

© UIT 2017

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.2392-0

**Aplicaciones de la transmisión inalámbrica de potencia  
por haces radioeléctricos**

(2016)

## ÍNDICE

*Página*

1	Introducción.....	2
2	Aplicaciones desarrolladas para las tecnologías TIP por ondas radioeléctricas.....	3
2.1	Red de sensores con alimentación inalámbrica (App ID: a1).....	3
2.2	Cargador inalámbrico de dispositivos móviles (App ID: a2).....	7
2.3	Hoja de transferencia de potencia inalámbrica (App ID: b1).....	10
2.4	TPM en tubos (App ID: b2).....	12
2.5	Edificios de microondas (App ID: b3).....	14
2.6	TIP a objetos en movimiento/volantes (App ID: c1).....	16
2.7	TIP punto a punto (App ID: c2).....	22
2.8	Carga inalámbrica de vehículos eléctricos (App ID: c3).....	27
2.9	Satélite de energía solar (App ID: c4).....	31
3	Tecnologías empleadas en las aplicaciones TIP.....	33
4	Organizaciones cuya contribución a la normalización de la TIP está prevista.....	35
4.1	Europa.....	35
4.2	Japón.....	36
4.3	Otras organizaciones internacionales.....	37
5	Situación del espectro para la TIP por haces de ondas radioeléctricas.....	38
6	Resumen.....	38

## 1 Introducción

La tecnología de transmisión (o transferencia) inalámbrica de potencia (TIP) se considera revolucionaria, pues, cuando la energía eléctrica pueda suministrarse de manera inalámbrica, dejaremos de correr el riesgo de carecer de ella. La transmisión de potencia por ondas radioeléctricas se remonta a los primeros trabajos de Nikola Tesla en 1899. Tesla hizo su primer intento de transmitir energía sin hilos en 1899. Para ello utilizó energía de baja frecuencia a 150 kHz, pero no tuvo éxito. En paralelo a los primeros experimentos de TIP de Tesla, M. Hutin y M. Le-Blanc presentaron la maquinaria y el método para alimentar un vehículo eléctrico (VE) por inducción en 1894 utilizando un generador CA de unos 3 kHz [HUT 94]. Los VE empezaron a desarrollarse poco tiempo después de la invención del motor a vapor, hace unos 100 años. Tanto la TIP por inducción, también llamada «sin haces», como la TIP por haces radioeléctricos, denominada «por haces», empezaron su andadura a principios del siglo XX.

Esta evolución de la TIP por haces radioeléctricos se debe a William Brown, que en la década de 1960 empezó a utilizar la tecnología de microondas desarrollada durante la Segunda Guerra Mundial. Transmitió la energía de las microondas desde un transmisor a un receptor (punto a punto) con una eficiencia global (CC-microondas-CC) del 54% en su laboratorio [BRO 73]. Cuando utilizamos las frecuencias de microondas, la TIP por microondas se denomina transmisión de potencia por microondas (TPM). Gran parte de los proyectos de investigación sobre la TIP por inducción para la carga inalámbrica de VE se llevó a cabo en las décadas de 1980 y 1990 [SHI 14]. La comercialización de cables sin contacto es posterior a 1990. Uno de los hitos de la TIP por inducción se sitúa en 2006, cuando el Instituto de Tecnología de Massachusetts (*Massachusetts Institute of Technology* (MIT)) presentó la tecnología de potencia inalámbrica sin haces denominada TIP por acoplamiento resonante [KUR 07]. Hoy en día, las tecnologías de TIP por resonancia se están empezando a comercializar. La industria del automóvil confía en la TIP para las aplicaciones de VE en un futuro próximo. En 2014 se publicó en el Informe UIT-R SM.2303 información sobre la TIP con tecnologías distintas de los haces radioeléctricos como respuesta parcial a la Cuestión UIT-R 210-3/1. Tras la presentación del MIT, se está prestando una atención especial, por revolucionarias, a una serie de tecnologías de TIP, como la inducción magnética, el acoplamiento resonante, la transmisión por haces radioeléctricos, etc.

En este Informe se presenta información sobre la TIP por haces radioeléctricos principalmente. Se abarca también la transmisión de potencia por ondas radioeléctricas, en general, que puede comprender aplicaciones sin haces, como la cosecha energética, pero no se incluye la inducción magnética, la resonancia magnética ni el acoplamiento capacitivo, que se abordan en el Informe UIT-R SM.2303.

A fin de materializar estas aplicaciones será necesario seguir estudiando las interacciones entre los sistemas TIP y los demás sistemas existentes, así como los aspectos relativos a la seguridad, como la exposición de las personas a los campos electromagnéticos.

- [BRO 73] Brown, W.C., «Adapting Microwave Techniques to Help Solve Future Energy Problems», 1973 G- MTT International Microwave Symposium Digest of Technical Papers 73.1, pp. 189-191, 1973.
- [HUT 94] Hutin, M. and M. Le-Blanc, «Transformer System for Electric Railways», US Patent Number 527,875, 1894.
- [KUR 07] Kurs, A., A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljačić, «Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances», *Science*, Vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [SHI 14] Shinohara, N., «Wireless Power Transfer via Radiowaves (Wave Series)», ISTE Ltd. y John Wiley & Sons, Inc., Gran Bretaña y Estados Unidos, 2014.1.

## 2 Aplicaciones desarrolladas para las tecnologías TIP por ondas radioeléctricas

Las principales características de la TIP por haces radioeléctricos son: 1) TIP a larga distancia; 2) ausencia de acoplamiento magnético entre la antena transmisora y la antena receptora, lo que difiere de la TIP por acoplamiento inductivo y la TIP por acoplamiento resonante; y 3) aplicaciones variadas, por ejemplo, sensores de baja potencia, cargadores inalámbricos de alta potencia, enorme transferencia de energía desde la central eléctrica, etc.

### 2.1 Red de sensores con alimentación inalámbrica (App ID<sup>1</sup>: a1)

En la Recomendación UIT-T Y.2221 [ITU 10] se define una red de sensores como la red formada por nodos sensores interconectados que intercambian los datos detectados mediante comunicación alámbrica o inalámbrica. Las redes de sensores inalámbricas (RSI) representan una de las tecnologías de la información de más rápida evolución y que prometen ofrecer aplicaciones diversas en las redes de la próxima generación (NGN) de acuerdo con el Documento Técnico UIT-T Y.2000 [ITU 14]. La eficacia energética es muy importante y en ese documento se sostiene lo siguiente:

«Los componentes de la RSI pueden estar distribuidos a lo largo de zonas de muchos kilómetros, sobre todo si el usuario de la RSI la gestiona a través de Internet. Al mismo tiempo, los nodos sensores pueden situarse en lugares inaccesibles y también es posible desconocer la situación precisa de cada nodo sensor. Asimismo, una RSI puede estar formada por docenas, cientos o incluso miles de nodos sensores. En esas condiciones, es imposible que el usuario se ocupe de cargar los sensores, motivo por el cual los nodos sensores deben ofrecer una alta eficacia energética y funcionar con una batería de pequeño tamaño y bajo coste durante meses o años. Tal funcionamiento de ultrabaja potencia sólo puede lograrse con componentes de hardware de baja potencia.»

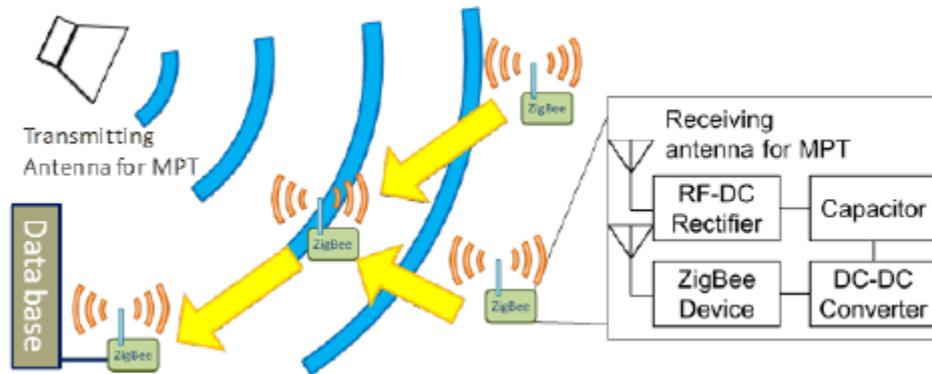
#### 2.1.1 Situación de Japón

Gracias a la energía de microondas se puede dirigir un sensor inalámbrico sin batería. La energía inalámbrica puede transmitirse activamente a los sensores que necesiten de alimentación eléctrica (Fig. 2.1.1). Con este sistema se puede solucionar el problema expuesto. Una rectena, formada por una antena y un circuito rectificador con diodos, recibe y rectifica la onda radioeléctrica en corriente continua (CC). La eficiencia de la conversión radiofrecuencia (RF) – CC es teóricamente del 100%, y alcanza aproximadamente el 90% a 2,45 GHz con una rectena evolucionada.

---

<sup>1</sup> «App ID» significa ID de aplicación y se refiere a las distintas aplicaciones de la tecnología TIP por haces. Esas aplicaciones se resumen en el Cuadro 3.1.

FIGURA 2.1.1  
 Imagen de sensores con alimentación inalámbrica (ZigBee)  
 [ICH 12]



Leyenda:

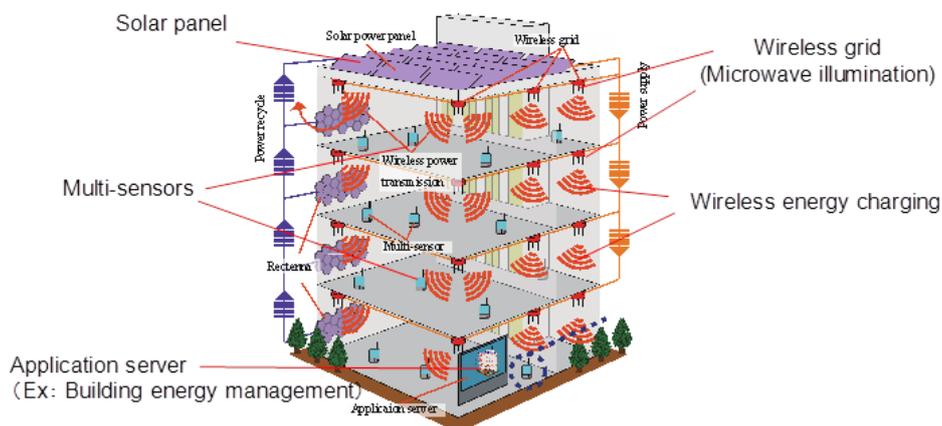
- 1 Antena transmisora para MPT
- 2 Base de datos
- 3 Antena transmisora para MPT
- 4 Rectificador RF-CC
- 5 Condensador
- 6 Dispositivo ZigBee
- 7 Conversor CC-CC

El sensor ZigBee/IEEE802.15.4 puede ser un sensor con alimentación inalámbrica. La red ZigBee está formada por un coordinador, un encaminador y un dispositivo extremo. El coordinador es simplemente un dispositivo en la red que la coordina. El encaminador se encarga de retransmitir los datos de otros encaminadores y dispositivos extremos, así como la información detectada. El dispositivo extremo simplemente envía datos y, cuando no lo hace, permanece en reposo. Por consiguiente, el consumo energético del dispositivo extremo es inferior al de los demás dispositivos. El encaminador y el dispositivo extremo envían en total casi 2 ms de datos cada 1,14 s. El coordinador desconecta cualquiera de los dispositivos de su red si no recibe datos de ellos durante 15 s. El dispositivo fuera de red debe realizar los procedimientos necesarios para reintegrarse en la red. Cuando el dispositivo extremo y el encaminador reintegran la red y se comunican entre ellos, gastan respectivamente 9,46 mW y 57,4 mW. Cuando no se integran en la red y están en reposo, gastan respectivamente 61,8 mW y 57,1 mW [ICH 12]. El consumo eléctrico es un ejemplo que indica que es posible dirigir los sensores ZigBee únicamente con energía de microondas.

Otra red de sensores con alimentación inalámbrica propuesta por Japón se denomina red eléctrica inalámbrica o iluminación por microondas y su estructura es la que se muestra en la Fig. 2.1.2 [SAK 10] [MAE 13]. El sistema ofrece alimentación inalámbrica e información inalámbrica de los RF-ID activos en la banda de 920 MHz. El sistema utiliza 4 canales (1 W) sin detección de portadora para la alimentación inalámbrica de los RFID pasivos. En la red de sensores se utilizan 77 canales (1 mW) para los RFID activos. La potencia instantánea recibida debe ser superior a la potencia consumida por el sensor. La potencia consumida media se controla modificando el ciclo de trabajo. Se utiliza en la sala un transmisor multipotencia y se proponen diversos cambios de portadora en las múltiples frecuencias utilizadas para reducir las ondas estacionarias en una sala cerrada. La diversidad de cambio de portadora reduce efectivamente las ondas estacionarias y crea en la sala una densidad de potencia aproximadamente uniforme.

FIGURA 2.1.2

**Concepto de red eléctrica inalámbrica  
(iluminación por microondas)  
[SAK 10]**



## Leyenda:

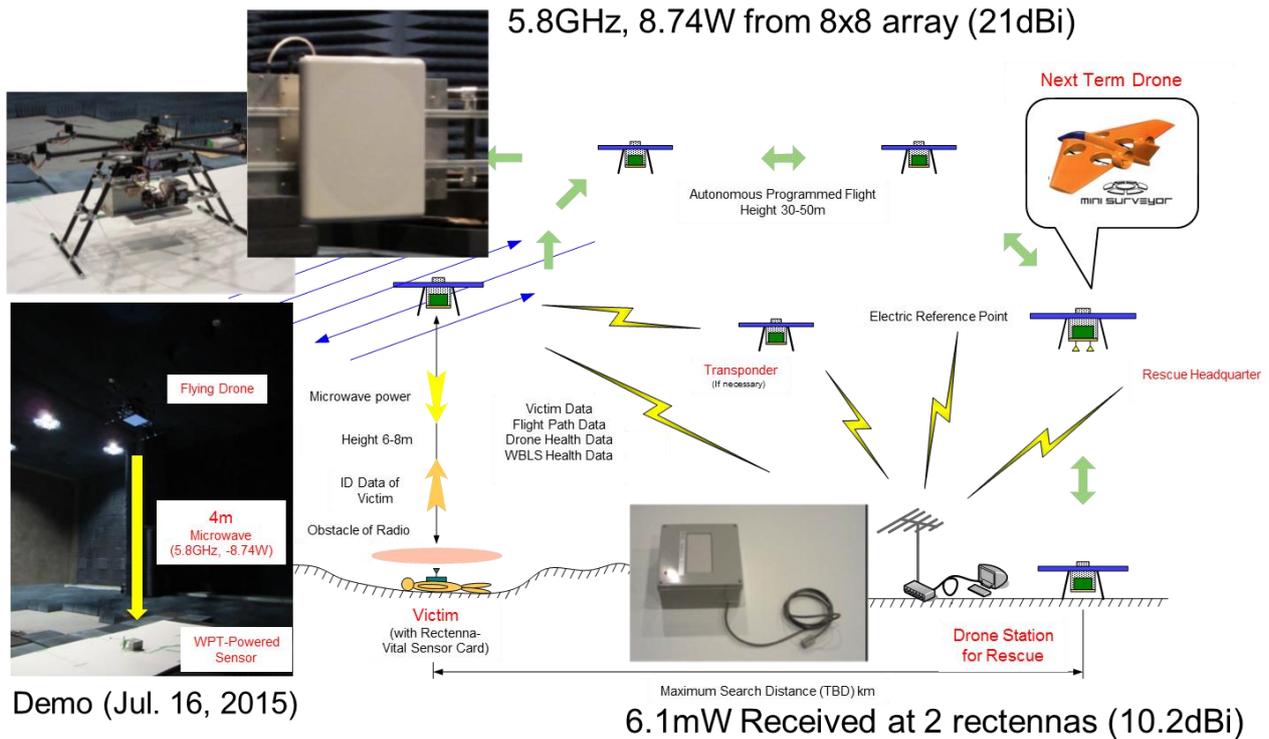
- 1 Panel solar
- 2 Panel de alimentación solar
- 3 Red eléctrica inalámbrica
- 4 Red eléctrica inalámbrica (iluminación por microondas)
- 5 Reciclaje energético
- 6 Multisensores
- 7 Transmisión inalámbrica de potencia
- 8 Multisensores
- 9 Rectena
- 10 Servidor de aplicación (por ejemplo, gestión energética del inmueble)
- 11 Servidor de aplicación

Hay una empresa japonesa que comercializa sensores inalámbricos con TIP en la banda de 920 MHz [DEN 13]. La distancia de aplicación es inferior a 5 m. La eficiencia de conversión RF-CC es de aproximadamente el 60%. La empresa propone aplicaciones de sensor inalámbrico para la detección en entornos con altas temperaturas (85-120° C), la detección en objetos en rotación o movimiento y la detección en entornos difíciles, por ejemplo, en exteriores o entornos marinos, etc. Se ha desarrollado una rectena de alta eficacia, cuya eficiencia de conversión RF-CC es de aproximadamente el 91,6% a 8W, 2,45 GHz y 7 W [FUR 13].

Desde 2015 se ofrece en Japón una aplicación de detección inalámbrica mediante un dron volador. Uno de los puntos débiles de la TIP es la desadaptación entre la potencia requerida y el tamaño del sistema de TIP, lo que incluye el tamaño de la antena y la potencia de las ondas radioeléctricas transmitidas. Al aumentar la distancia entre la antena transmisora y la antena receptora de TIP, se reduce la eficiencia del haz hasta ser inferior a las expectativas del usuario. También ocurre en ocasiones con los sensores TIP. Gracias al dron volador, la distancia entre la antena transmisora y la antena receptora de TIP se reduce y el sistema de TIP puede ser más pequeño que sin el dron. Este sistema de TIP se denomina «Sistema de detección sin batería inalámbrico asistido por multicóptero (WBLS)». El primer experimento se llevó a cabo en julio de 2015 en la Universidad de Kyoto con la participación de WiPoT, Universidad de Kyoto, Mini-Surveyor Consortium and Autonomous Control Systems Laboratory Ltd. Se transmitió a 5,8 GHz una energía de microondas de 8,74 W desde una matriz de antena 8 × 8 (21 dBi) a un dron volador (multicóptero), como se muestra en la Fig. 2.1.3. La energía recibida y rectificadora a 6,1 mW CC alimenta un sensor. Se prevé que las aplicaciones del WBLS asistido por multicóptero sean el rescate de víctimas, la detección con alimentación TIP en volcanes y la inspección de infraestructuras (puentes, túneles), etc.

FIGURA 2.1.3

Concepto de WBSL asistido por multicóptero y su demostración en julio de 2015 en Japón



Leyenda:

- 1 5,8 GHz, 8,74 W de matriz 8x8 (21 dBi)
- 2 Demostración (16 de julio de 2015)
- 3 6,1 mW recibidos en 2 rectenas (12,2 dBi)
- 4 Dron volador
- 5 Microondas
- 6 Sensor con alimentación TIP
- 7 Energía de microondas
- 8 Altura 6-8 m
- 9 ID de la víctima
- 10 Obstáculo a las ondas radioeléctricas
- 11 Víctima (con tarjeta de sensor vital-rectena)
- 12 Datos de la víctima  
Datos del trayecto de vuelo  
Datos del estado del dron  
Datos del estado del WBSL
- 13 Altura de vuelo programada autónoma
- 14 Transponder (de ser necesario)
- 15 Punto de referencia eléctrico
- 16 Dron siguiente
- 17 Base de salvamento
- 18 Estación de drones de salvamento
- 19 Distancia máxima de búsqueda en km (por determinar)

[ICH 12] Ichihara, T., T. Mitani, and N. Shinohara, «Study on Intermittent Microwave Power Transmission to a ZigBee Device», Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012), pp. 209-212, 2012.

[ITU 10] «Requisitos para el soporte de los servicios y aplicaciones de redes de sensores ubicuos en el entorno de las redes de próxima generación.» Recomendación UIT-T Y.2221 (2010).

- [ITU 14] «Applications of Wireless Sensor Networks in Next Generation Networks,» ITU-T Technical Paper Y.2000 (2014).
- [DEN 13] DENGYO Corporation [http://www.den-gyo.com/solution/solution10\\_b.html](http://www.den-gyo.com/solution/solution10_b.html) (*en japonés*).
- [FUR 13] Furukawa, M., T. Minegishi, T. Ogawa, Y. Sato, P. Wang, H. Tonomura, M. Teramoto, and N. Shinohara, «Wireless Power Transmission to 10 kW Output 2.4 GHz-band Rectenna Array for Electric Trucks Application (*en japonés*)», IEICE Technical Report, WPT2012-7, pp. 36-39, 2013.
- [MAE 13] Maehara, D., R. Akai, G.K. Tran, K. Sakaguchi, S. Sampei, K. Araki, and H. Iwai, «Experiment on Battery-less Sensor Activation via Multi-point Wireless Energy Transmission», Proc. of 2013 IEEE 24th Annual Int. Sympo. On Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 2346-2350, 2013.
- [SAK 10] Sakaguchi, K., R.P. Wicaksono, K. Mizutani, and T. Khanh, «Wireless Grid to Realize Ubiquitous Networks with Wireless Energy Supply (*en japonés*)», IEICE Tech. Report, Vol. 109, No. 442.

## 2.2 Cargador inalámbrico de dispositivos móviles (App ID: a2)

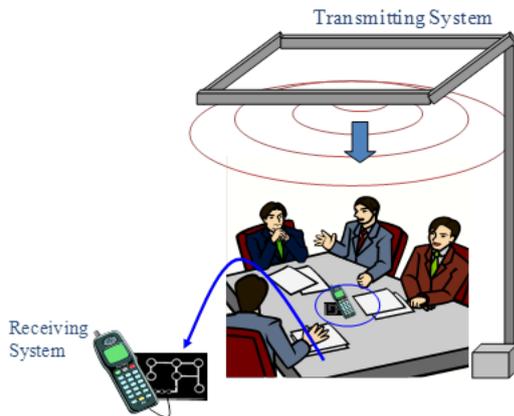
### 2.2.1 Situación en Japón

Con los sensores se pueden aprovechar las ventajas que ofrece la TIP por ondas radioeléctricas porque son dispositivos que consumen poca energía. Sin embargo, algunos dispositivos móviles funcionan con batería y la TIP debería utilizarse para alimentarlos o cargarlos de manera inalámbrica. Con este objetivo se propuso a finales de la década de 1990 [SHI 04] [SHI 05] un concepto denominado fuente de alimentación ubicua (FAU), que se basa en que las microondas están en todas partes en todo momento (ubicuas) y siempre disponibles para la TIP.

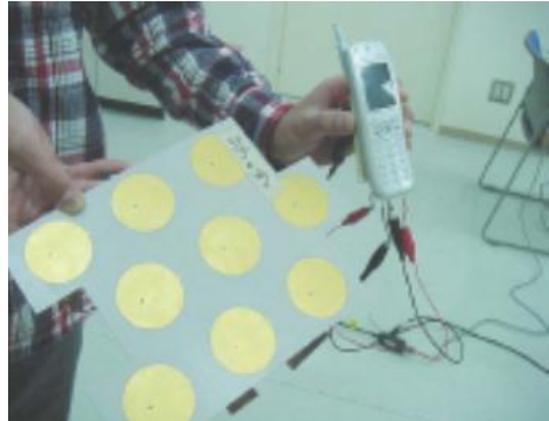
En la Fig. 2.2.1 (a) se muestra la FAU. La energía de microondas a 2,45 GHz (la banda de frecuencias industrial, científica y médica (ISM) se encuentra en la gama 2,40-2,50 GHz) se transmite desde los bordes del techo para cargar teléfonos móviles. Es muy posible crear una densidad de potencia de microondas uniforme en una sala FAU instalando antenas en los bordes del techo. Se escogen como antenas transmisoras antenas de ranura por su bajo coste. Por el mismo motivo se utiliza un magnetrón estabilizado en frecuencia y controlable en fase. Sin embargo, al basarse el concepto de FAU en una «fuente de alimentación inalámbrica en cualquier momento y lugar», el diseño de la FAU está limitado por motivos de seguridad relacionados con la exposición prolongada de las personas a las microondas. El nivel de seguridad definido es inferior a  $1 \text{ mW/cm}^2$  para una exposición continua de todo el cuerpo. En una sala experimental de  $5,8 \times 4,3 \text{ m}$ , se transmitieron aproximadamente 150 W de energía de microondas desde el magnetrón para crear una densidad de potencia de microondas uniforme igual o inferior a  $1 \text{ mW/cm}^2$ . También se necesitan rectenas de alta eficacia para el funcionamiento con una densidad de potencia de microondas igual o inferior a  $1 \text{ mW/cm}^2$ . En esas condiciones se logró cargar teléfonos móviles, como se muestra en la Fig. 2.2.1 (b). Además, los teléfonos móviles pueden seguir utilizándose en la sala FAU dada la diferencia entre la energía de microondas a 2,45 GHz y las frecuencias de 1,9 GHz que utiliza el sistema de comunicación.

FIGURA 2.2.1

(a) Concepto «fuente de alimentación ubicua»



(b) Experimento de carga inalámbrica de un teléfono móvil con FAU [SHI 04]



Leyenda:

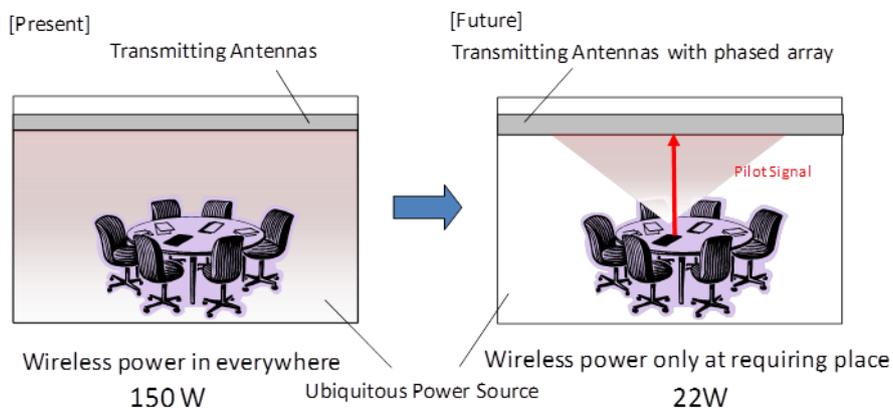
- 1 Sistema transmisor
- 2 Sistema receptor

Como extensión de los sistemas FAU puede utilizarse sistemas controlados por fase para reducir la potencia total transmitida y reducir la radiación imprevista en lugares donde no se necesita (Fig. 2.2.2). Para una FAU direccional en una sala de dimensiones equivalentes a las del experimento FAU descrito, sólo se necesita una energía de microondas de 22 W (en comparación con los 150 W del sistema FAU convencional) para que la densidad de potencia entorno al dispositivo sea de 1 mW/cm<sup>2</sup>. El sistema controlado por fase es aún demasiado oneroso para la TIP o la FAU comerciales. El costo de tal sistema depende del de sus componentes, en particular del desfasador.

Por consiguiente, se han propuesto sistemas sin desfasador para reducir la energía de microondas total necesaria para la FAU a fin de reducir los costos [HAS 11].

FIGURA 2.2.2

FAU presente y futuro con un sistema controlado por fase



Leyenda:

- 1 [Presente]
- 2 Antenas transmisoras
- 3 [Futuro]
- 4 Antenas transmisoras controladas por fase
- 5 Potencia inalámbrica en todas partes
- 6 Potencia inalámbrica sólo en el lugar donde se necesita
- 7 Fuente de alimentación ubicua

Como se indica en el § 2.4 se llevó a cabo en 2009 en Japón [MIT 10] un experimento de FAU de emergencia. En la Fig. 2.2.3 se muestra una imagen del sistema experimental. En todo el mundo se están llevando a cabo proyectos de investigación que implican estaciones base de emergencia para teléfonos móviles situados en globos aerostáticos o aeronaves. Sin embargo, aunque es posible crear estaciones base para teléfonos móviles para emergencias, un teléfono móvil no puede funcionar sin electricidad, por lo que el sistema FAU de emergencia se propone para la recuperación rápida y periódica de electricidad de manera inalámbrica. En el experimento de 2009 se cargó un teléfono móvil emitiendo potencia inalámbrica desde una aeronave.

FIGURA 2.2.3

Imagen de un sistema FAU de emergencia y foto del experimento (2009)



Leyenda:

- 1 Magnetron controlado por fase
- 2 (Se situó una antena espiral justo debajo del sistema transmisor)
- 3 Antena receptora (antena espiral)

## 2.2.2 Situación en Estados Unidos

En la conferencia tecnológica TechCrunch disrupt 2013 una empresa de Estados Unidos presentó un cargador inalámbrico comercial para teléfonos móviles mediante transmisión de energía de microondas (MPT), cuya frecuencia es idéntica a la de WiFi [AOL 13]. Se denomina «Cota» y puede facilitar de manera inalámbrica 1 W de potencia a una distancia de 30 pies. En la conferencia se mostró cómo se carga un iPhone 5 a distancia con un prototipo de sistema TIP. Según la empresa, la versión comercial de Cota estaría lista en 2013-14 y la versión de consumo antes de 2015. Hay otra empresa de Estados Unidos que empezó a fabricar un cargador inalámbrico de teléfonos móviles, llamado «Wattup», en 2015. Estos sistemas utilizan dos frecuencias: 2,4 GHz (sin licencia) para la comunicación de baja potencia Bluetooth y 5,7-5,8 GHz (industrial, científica y médica (ISM) sin licencia) para la transferencia de energía.

[AOL 13] Aol Tech. <http://techcrunch.com/2013/09/09/cota-by-ossia-wireless-power/>.

[HAS 11] Hashimoto, K., T. Ishikawa, T. Mitani, and N. Shinohara, «Improvement of a ubiquitous power source», *Proc. of International Union of Radio Science (URSI) General Assembly 2011*, CD-ROM CHGBDJK-1.pdf, 2011.

[MIT 10] Mitani, T., H. Yamakawa, N. Shinohara, K. Hashimoto, S. Kawasaki, F. Takahashi, H. Yonekura, T. Hirano, T. Fujiwara, K. Nagano, H. Ueda, and M. Ando, «Demonstration Experiment of Microwave Power and Information Transmission from an Airship», *Proc. of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Radio System and Space Plasma 2010*, pp. 157-160, 2010.

- [SHI 04] Shinohara, N., H. Matsumoto, T. Mitani, H. Shibata, T. Adachi, K. Okada, K. Tomita, and K. Shinoda, «Experimental Study on «Wireless power Space» (en japonés), *IEICE Tech. Report*, SPS2003-18, pp. 47-53, 2004.
- [SHI 05] Shinohara, N., T. Mitani, and H. Matsumoto, «Study on Ubiquitous Power Source with Microwave Power Transmission», *Proc. of International Union of Radio Science (URSI) General Assembly 2005*, CD-ROM C07.5(01145).pdf, 2005.

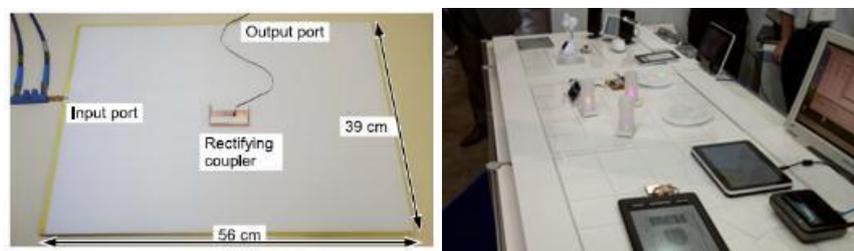
## 2.3 Hoja de transferencia de potencia inalámbrica (App ID: b1)

### 2.3.1 Situación en Japón

En el marco de la actual reglamentación sobre ondas radioeléctricas, un TPM mediante guíaondas cerrado es una aplicación que ofrece un buen potencial. En Japón ya se presentó y desarrolló otro TPM mediante guíaondas cerrado denominado «sistema de transmisión de potencia por guíaondas bidimensional (2DWPT) o sistema TPM de superficie» [SHD 07]. En los sistemas 2DWPT las microondas se propagan por una hoja guíaondas y su recepción se realiza selectivamente por dispositivos receptores especiales en esa hoja (Fig. 2.3.1). El sistema 2DWPT exige inevitablemente un equilibrio entre la seguridad y la capacidad de transmisión de potencia. En las Figs. 2.3.2 (a) y (b) se muestra una superficie guíaondas mejorada que ha demostrado lograr una mejor compatibilidad electromagnética (EMC) [NOD 11] [NOD 12]. Las microondas se reciben en un acoplador resonador guíaondas anular (WRR) que extrae la potencia del guíaondas a través de un aislante espeso (Fig. 2.3.2 (c)). Los objetos exteriores, cercanos o incluso tangentes a la hoja, no se exponen a fuertes campos electromagnéticos. El acoplador WRR tiene un factor de calidad notablemente elevado ( $Q$  elevado) en estado resonante, lo que resulta fundamental para el soporte de la transmisión selectiva de potencia. El WRR está conectado a un circuito rectificador, dirigido en clase F. La eficacia total, definida como la relación entre la CC de salida del acoplador rectificante y la entrada de microondas en la hoja, alcanzó un máximo del 40,4% con una entrada de microondas de 1 W en la banda de 2,4 GHz con un acoplador de  $6,4 \times 3,6 \text{ cm}^2$  en una hoja de  $56 \times 39 \text{ cm}^2$  (casi 100 veces el área del acoplador) [NOD 12].

FIGURA 2.3.1

Fotografías del sistema 2DWPT



Leyenda:

- 1 Puerto de salida
- 2 Puerto de entrada
- 3 Acoplador rectificante

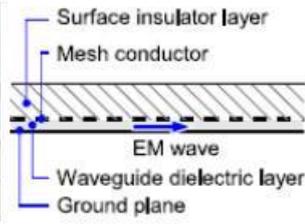
FIGURA 2.3.2

Hoja de transferencia de potencia inalámbrica

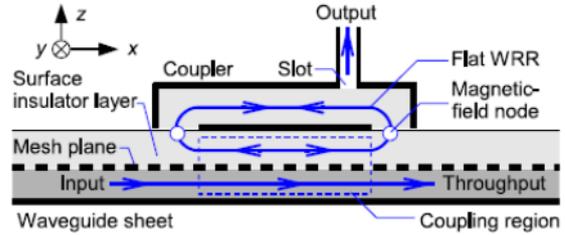
(a) Vista cenital de la hoja guíaondas por el borde



(b) Esquema transversal



(c) Receptor de potencia inalámbrico [NOD 11] [NOD 12]



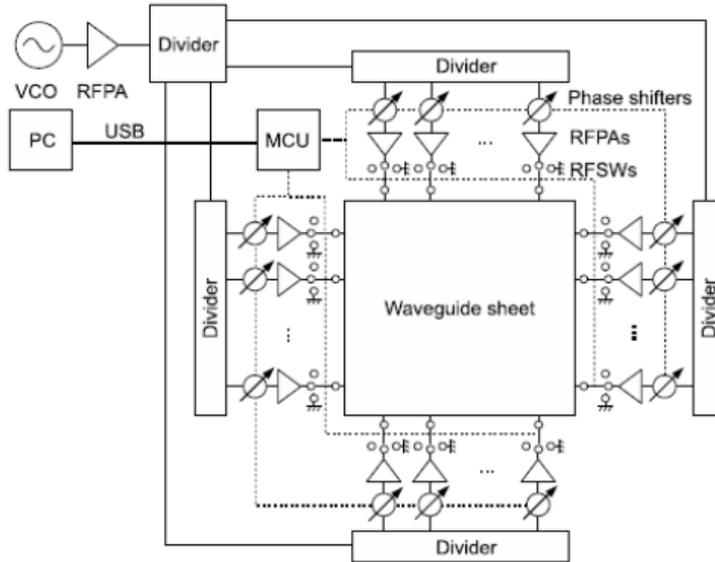
Leyenda:

- 1 Capa aislante de superficie
- 2 Conductor en malla
- 3 Onda EM
- 4 Capa dieléctrica guíaondas
- 5 Plano horizontal

- 6 Capa aislante de superficie
- 7 Acoplador
- 8 Ranura
- 9 Salida
- 10 WRR plano
- 11 Nodo electromagnético
- 12 Plano en malla
- 13 Entrada
- 14 Caudal
- 15 Hoja guíaondas
- 16 Región de acoplamiento

FIGURA 2.3.3

Diagrama de bloques del sistema de alimentación por microondas con un sistema controlado en fase con siete amplificadores RF en cada borde [NOD 13]



Leyenda:

- 1 Divisor
- 2 Controladores de fase
- 3 Hoja guíaondas

En el sistema 2DWPT se utilizan microondas y éstas se difunden de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell aun cuando se pasa de tres a dos dimensiones. Para suprimir la radiación imprevista puede utilizarse un sistema controlado por fase al sistema 2DWPT, lo que equivale a un sistema 3DWPT [NOD 13]. En la Fig. 2.3.3 se presenta un sistema 2DWPT experimental con un sistema controlado en fase de la Universidad de Tokio. Los resultados del experimento indican que la variación de eficacia en el punto receptor de la hoja con control de fase se reduce en 2 dB, mientras que la variación era superior a 10 dB sin control de fase.

El sistema 2DWPT ha sido normalizado por ARIB (Asociación de Industrias y Empresas de Radiocomunicaciones) en la norma ARIB STD-T113[ARI15]. La frecuencia es  $2,498 \text{ GHz} \pm 1 \text{ MHz}$  y la potencia es inferior a 30W.

[ARI15] ARIB STD-T113 [http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-T113v1\\_0.pdf](http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/1-STD-T113v1_0.pdf)  
(en japonés)

[NOD 11] Noda, A., and H. Shinoda, «Selective wireless power transmission through high-Q flat waveguide-ring resonator on 2-D waveguide sheet,» *IEEE Trans. MTT*, Vol. 59, No. 8, pp. 2158-2167, 2011.

[NOD 12] Noda, A., and H. Shinoda, «Waveguide-Ring Resonator Coupler with Class-F Rectifier for 2-D Waveguide Power Transmission», *Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012)*, pp. 259-262, 2012.

[NOD 13] Noda, A., and H. Shinoda, «A Phased Array Feeding System for 2-D Waveguide Power Transmission (en japonés)», *Proc. of IEICE*, BSC-1-8, marzo de 2013.

[SHD 07] Shinoda, H., Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai, «Surface sensor network using inductive signal transmission layer,» *Proc. of Int. Conf. on Networked Sensing Systems (INSS) 2007*, pp. 201-206, 2007.

## 2.4 TPM en tubos (App ID: b2)

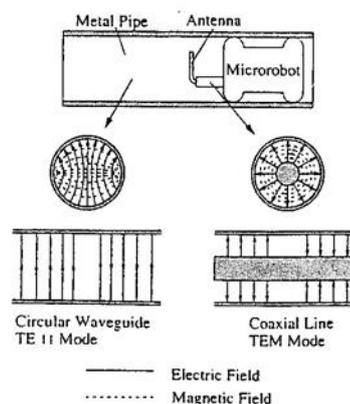
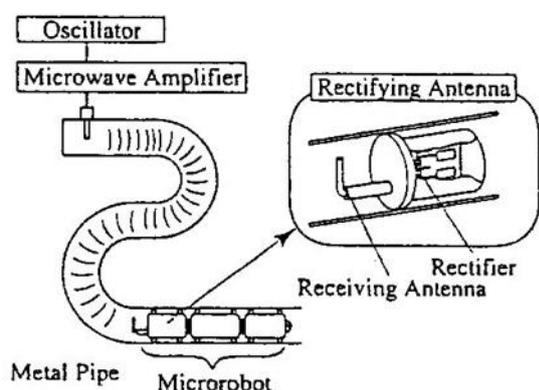
### 2.4.1 Situación en Japón

En la década de 1990, en Japón, se creó un microrrobot en movimiento por un tubo alimentado por un TPM en el tubo. El concepto es el que se muestra en la Fig. 2.4.1 (a). El sistema de TPM en tubos se creó para microondas de la gama de 14 GHz, como se ve en la Fig. 4.4.1 (b) [SHB 97], que se propagan por un tubo circular de 15 mm de diámetro, que sirve de guíaondas circular, en el modo  $TE_{11}$  (Fig. 2.4.1 (b)) y cuya pérdida de transmisión estimada es  $< 1 \text{ dB/m}$ . La rectena, compuesta por una antena monopolo y un circuito rectificador, recibe la energía de microondas y alimenta en CC rectificada el sistema de dirección inercial del robot, compuesto por células bimórficas piezoeléctricas. El microrrobot recibe 50 mW de energía de microondas y puede moverse a una velocidad de 1 mm/s por el tubo cuando se transmite 1 W de energía de microondas por el tubo.

FIGURA 2.4.1

(a) Concepto de robot en un tubo alimentado por TPM

(b) Método convencional de conversión de potencia de un guíaondas circular a un cable coaxial [SHB 97]



Leyenda:

- 1 Oscilador
- 2 Amplificador de microondas
- 3 Tubo de metal
- 4 Microrrobot
- 5 Antena rectificadora
- 6 Antena receptora
- 7 Rectificador

- 8 Tubo de metal
- 9 Antena
- 10 Microrrobot
- 11 Guíaondas circular modo TE 11
- 12 Línea coaxial modo TEM
- 13 Campo eléctrico
- 14 Campo magnético

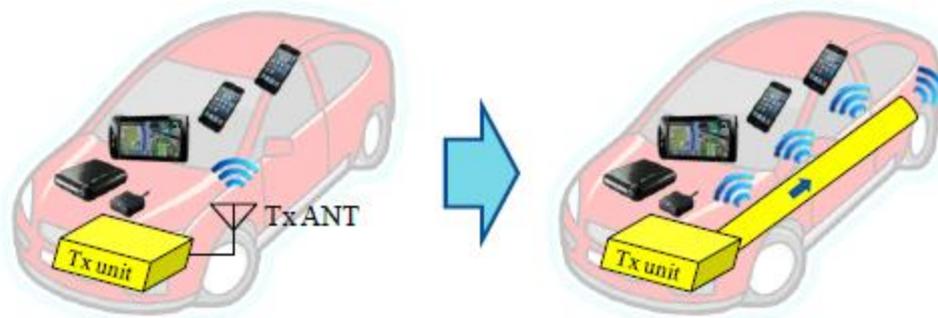
En la década de 1990 se presentó en Japón un sistema TPM para alimentar un robot de observación en un conducto de gas [HIR 97] [HIR 99]. El diámetro del conducto de gas era de unos 155 mm, adecuado para la propagación de microondas a una frecuencia de 2,45 GHz. Los problemas asociados con esta aplicación TPM concreta eran: 1) la pérdida de propagación desconocida en conductos de gas oxidados; y 2) la compleja ramificación de la red de suministro de gas. La pérdida de propagación se estimó teórica y experimentalmente y oscilaba entre  $-0,1$  y  $-1,0$  dB/m. Se concluyó que la pérdida era suficientemente baja para poder propagar energía de microondas por un conducto de gas.

La complejidad de la ramificación de la red planteaba un problema más grave. En teoría las ondas radioeléctricas no pueden propagarse por todas las ramas del guíaondas y algunas de ellas no habrá recibido las ondas radioeléctricas. Los experimentos refrendaron la teoría e indicaron que el sistema TPM en tubos propuesto tenía una aplicación limitada.

En 2015 se presentó y desarrolló en Japón un nuevo tubo de ondas radioeléctricas para una aplicación TIP [ISH 15-1] [ISH 15-2]. El tubo de ondas radioeléctricas está chapado y procesado en un tubo de resina con cobertura conductora. Se ha creado un sistema experimental para la transmisión de potencia inalámbrica utilizando este tubo de ondas radioeléctricas, que ha confirmado que es posible transmitir inalámbricamente potencia de clase 100 mW en la banda de 5,8 GHz. El tubo de ondas radioeléctricas se utilizará en coches sin cableado, como se muestra en la Fig. 2.4.2.

FIGURA 2.4.2

Concepto de coche sin cableado con tubo de ondas radioeléctricas de TPM en tubos  
[ISH 15-1]



- [HIR 97] Hirayama, K., N. Shinohara, K. Hashimoto, H. Matsumoto, T. Nakauchi, and Y. Yoshida, «Fundamental Study of Microwave Power Transmission to a Robot Moving in Gas Pipes (en Japonés)», *Proc. of IEICE Comm.*, p. 116, marzo de 1997.
- [HIR 99] Hirayama, K., N. Shinohara, H. Matsumoto, and I. Nagano, «Study of Microwave Power Transmission to a Robot Moving in Gas Pipes (en Japonés)», *Proc. of IEICE Comm.*, p. 25, marzo de 1999.
- [IHI 15-1] Ishino, S., A. Kishimoto, Y. Takimoto, Y. Arai, Y. Huang, and N. Shinohara, «Study on WPT System Using a Radio Wave Hose as a New Transmission Line», *Proc. of 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc2015)*, P4.1, mayo de 2015.
- [ISH 15-2] Ishino, S., T. Miyagawa, and N. Shinohara, «A New Slotted Waveguide Using a Resin Hose with Metallic Coating», *Proc. of 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, diciembre de 2015.
- [SHB 97] Shibata, T., Y. Aoki, M. Otsuka, T. Idogaki, and T. Hattori, «Microwave Energy Transmission System for Microrobot», *IEICE Trans. Electr.*, Vol.E80-C, No. 2, pp. 303-308, 1997.

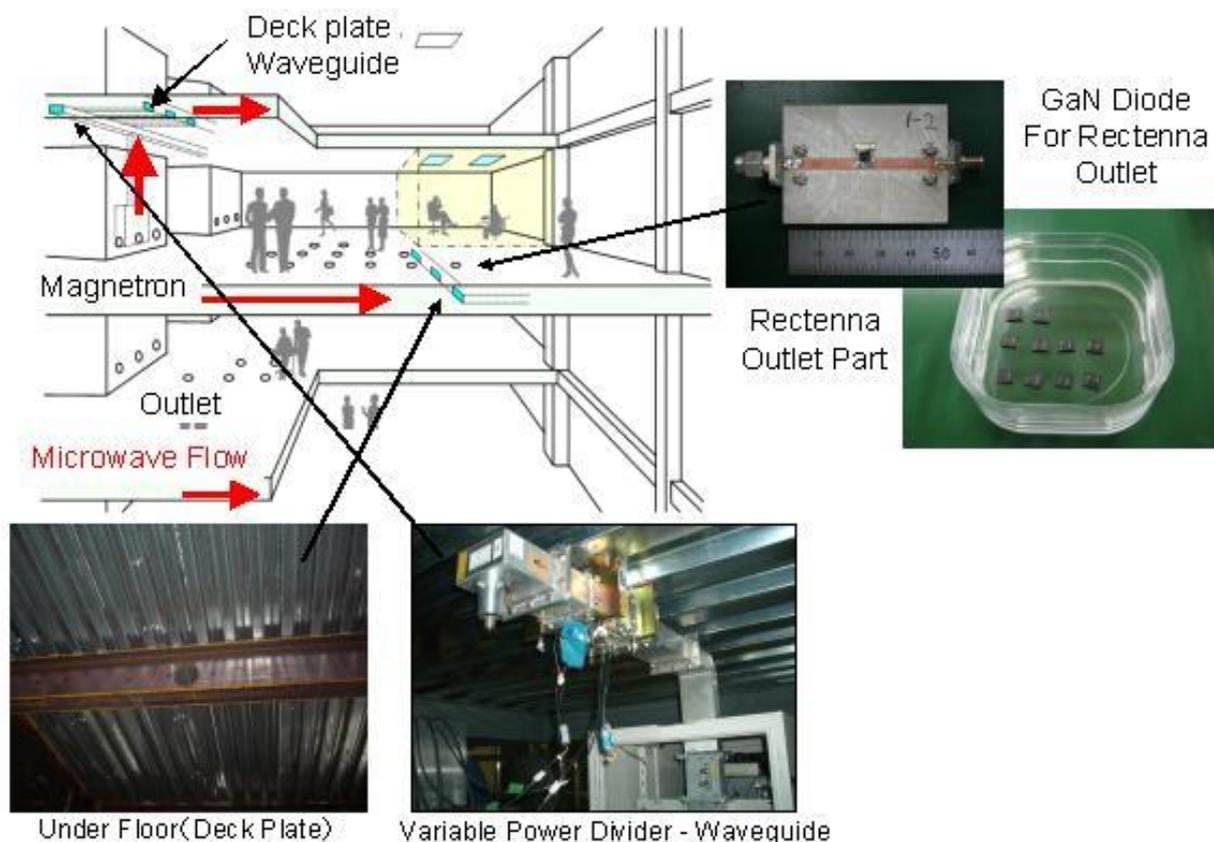
## 2.5 Edificios de microondas (App ID: b3)

### 2.5.1 Situación en Japón

Una empresa de construcción japonesa propuso, junto con la Universidad de Kyoto, un edificio inalámbrico utilizando la energía de microondas [SHI 14]. En la Fig. 2.5.1 se muestra el sistema de alimentación propuesto. Este sistema proporciona alimentación eléctrica de manera inalámbrica utilizando una cubierta formada por paneles de revestimiento que sirven de guíaondas para la transmisión de microondas. Se eligió la frecuencia de 2,45 GHz a causa de las limitaciones de tamaño de la cubierta convencional y se utilizó un magnetrón como transmisor de microondas para reducir los costos. El flujo de microondas se controlaba por divisores de potencia variables que alimentaban en energía de microondas sólo a los usuarios que la necesitaban y bloqueaban el flujo allí donde no había usuarios. Bajo el suelo se colocaron rectenas como convertidores CC y fuentes de alimentación CC. Ajustar la posición de la rectena resultó bastante sencillo al estar las microondas presentes prácticamente por toda la superficie bajo el suelo. Se supuso que la eficacia total de conversión de electricidad en CC mediante la transferencia de microondas era del 50%. Aunque los gastos corrientes del sistema del edificio de microondas aproximadamente duplican los de un hogar con cableado convencional, el costo inicial del edificio es menor gracias a que los costos de construcción son inferiores. Por consiguiente, se estima que el costo global del edificio durante toda su vida útil puede reducirse utilizando el sistema de microondas.

FIGURA 2.5.1

## Edificio inalámbrico con transmisión de potencia por microondas



Leyenda:

- 1 Cubierta guíaondas
- 2 Magnetrón
- 3 Toma
- 4 Flujo de microondas
- 5 Rectena de la toma
- 6 Diodo GaN para la rectena
- 7 Bajo el suelo (cubierta)
- 8 Divisor de potencia variable – Guíaondas

En su fase inicial, el sistema inalámbrico se consideró destinado para edificios de oficinas, que es donde más se utilizan ordenadores alimentados en CC y otros instrumentos semejantes. Se estima que un conversor CC necesita  $< 50 \text{ W}$  y  $> 3 \text{ kW}$  de energía de microondas se facilitan a una sola sala, lo que demuestra que el sistema proporciona suficiente energía para alimentar varios dispositivos eléctricos normales en cada sala. Las microondas que atraviesan las guíaondas de esta aplicación sirven de sistema UPS.

[SHI 14] Shinohara, N., N. Niwa, K. Takagi, K. Hamamoto, S. Ujigawa, J.-P. Ao, and Y. Ohno, «Microwave Building as an Application of Wireless Power Transfer», *Wireless Power Transfer*, pp. 1-9, 2014.4.

[TAK 09] Takahashi, K., J.-P. Ao, Y. Ikawa, C.-Y. Hu, H. Kawai, N. Shinohara, N. Niwa, and Y. Ohno, «GaN Schottky Diodes for Microwave Power Rectification», *Japanese Journal of Applied Physics (JJAP)*, Vol. 48, No. 4, pp. 04C095-1 – 04C095-4, 2009.

## 2.6 TIP a objetos en movimiento/volantes (App ID: c1)

### 2.6.1 Situación en Canadá

La TPM por ondas radioeléctricas es adecuada para alimentar objetos en movimiento/volantes. Un grupo canadiense del Centro de Investigación en Comunicaciones (Communication Research Centre (CRC)) llevó a cabo con éxito en 1987 el vuelo experimental de un avión sin carburante utilizando la TPM, denominado SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform; Fig. 2.6.1) [SCH 88] [SHA 88]. Se transmitió una señal de microondas de 10 kW a 2,45 GHz a un aeroplano modelo, de 2,9 m de longitud total y 4,5 m de envergadura, a más de 150 m de altitud.

### 2.6.2 Situación en Japón

En Japón se llevó a cabo con éxito, en 1992, una serie de vuelos experimentales de aeroplanos sin carburante con TPM con control de fase a 2,411 GHz en el marco del proyecto MILAX (Fig. 2.6.2) [MAT 93]. Fue el primer experimento TPM con conformación de haz y control de fase del mundo. Los experimentos realizados en el marco de los proyectos SHARP y MILAX tenían por objetivo la instalación de una plataforma de retransmisión a gran altitud estacionaria en la estratosfera.

FIGURA 2.6.1

Experimento de vuelo SHARP de Canadá y aeroplano modelo a escala 1/8 en 1987 [SHA 88]



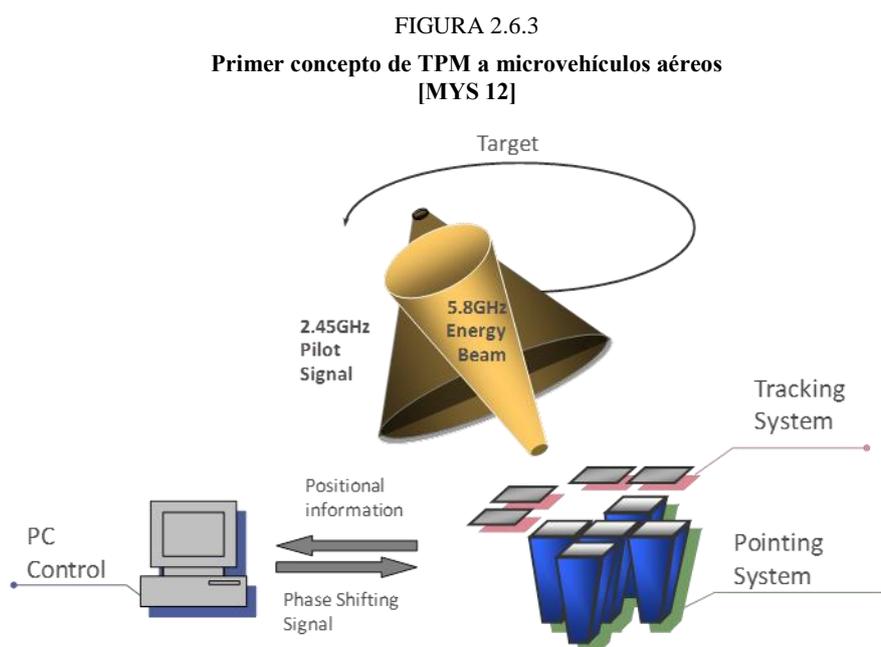
FIGURA 2.6.2

Aeroplano experimental del proyecto MILAX y sistema de control de fase utilizados en Japón en 1992



A principios del siglo XXI se presentaron y desarrollaron en Japón los proyectos de TPM a microvehículos aéreos (MAV) [MYS 12] y del aeroplano de observación de Marte [NAG 11] [NAG 12], destinados a alimentar aeroplanos de pequeño tamaño (Fig. 2.6.3). La TPM al MAV fue fruto de la Universidad de Kyoto. Los investigadores transmitieron energía de microondas a 5,8 GHz a un MAV en vuelo, que a su vez transmitía una señal piloto a 2,45 GHz para la detección de objetivos. Las rectenas se instalaron en el cuerpo del MAR. En un primer momento se utilizaron cinco antenas de bocina como sistema de control de fase. El diámetro del sistema de control de fase era de 330 mm y el espacio entre sus elementos era  $2\lambda$ . Cada antena de bocina proporcionaba 4 W de energía de microondas.

Para el sistema base se escogió un sistema de control de fase con 8 antenas Microstrip, con un espaciamiento entre elementos de  $1,36\lambda$ . Cada antena Microstrip proporcionaba 8 W de energía de microondas.

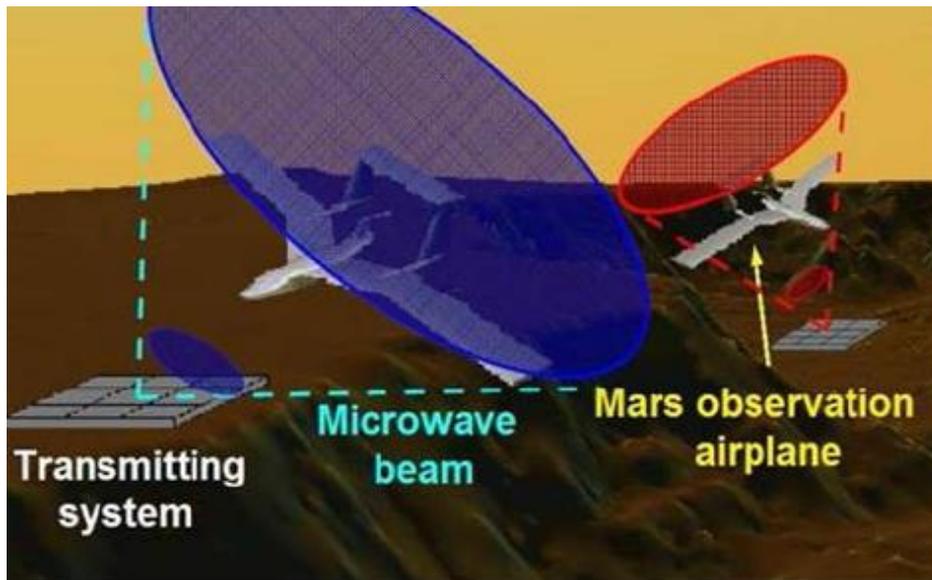


Leyenda:

- 1 Objetivo
- 2 Señal piloto a 2,45 GHz
- 3 Haz de energía a 5,8 GHz
- 4 Sistema de rastreo
- 5 PC de control
- 6 Información de posición
- 7 Señal con control de fase
- 8 Sistema de apuntamiento

FIGURA 2.6.4

Descripción de la TPM al aeroplano de observación de Marte  
[NAG 11] [NAG 12]



Leyenda:

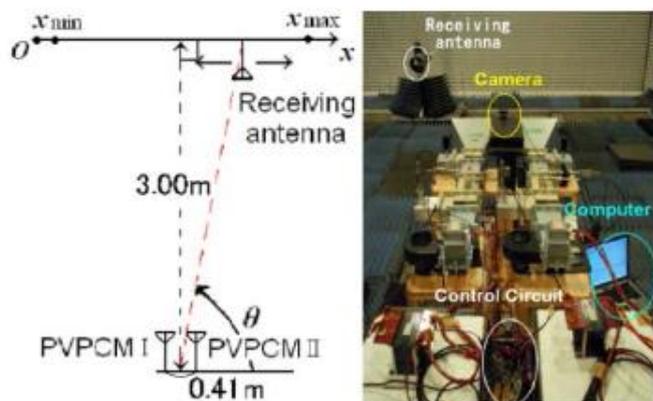
- 1 Sistema transmisor
- 2 Haz de microondas
- 3 Aeroplano de observación de Marte

El sistema de aeronave de microondas para la observación de Marte es fruto de la colaboración entre la Universidad de Kyoto y el Instituto de Tecnología de Kyusyu, Japón. La observación continua y amplia de la superficie de Marte es necesaria para entender las propiedades físicas del planeta. Hasta ahora la superficie de Marte se ha observado principalmente utilizando vehículos terrestres, que ni pueden moverse rápido ni hacer observaciones en superficies accidentadas. Así, la observación mediante pequeños aeroplanos está considerándose con interés como una alternativa a los vehículos terrestres. Para que el vuelo sea estable en la muy reducida atmósfera de Marte, el aeroplano debe pesar poco.

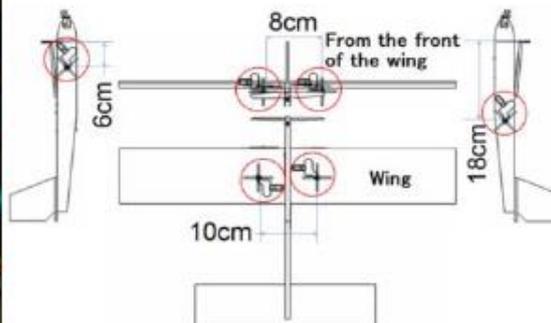
La TPM es una tecnología excelente para reducir, o incluso eliminar, las necesidades de carburante del aeroplano. En la Fig. 2.6.4 se muestra un posible aeroplano de observación de Marte [NAG 11] [NAG 12]. En la Fig. 2.6.5 se muestra una configuración experimental. Para el experimento se utilizó un sistema TPM con antena controlada en fase compuesta por «magnetrones con control de fase variable en potencia (PVPCM)». El PVPCM es una tecnología derivada del magnetrón con control de fase (PCM) creado por la Universidad de Kyoto. Un PVPCM puede transmitir a 2,45 GHz, 61 dBm de energía de microondas y controlar la dirección del haz mediante el control de fase [NAG 11]. El transmisor rastrea la posición del aeroplano con una cámara utilizando una aplicación de procesamiento de imágenes [NAG 12].

FIGURA 2.6.5

(a) Esquema y fotografía del magnetrón con control de fase



(b) Alineamiento de las seis rectenas del cuerpo del avión para los experimentos en el terreno [NAG 12]



Leyenda:

- 1 Antena receptora
- 2 Desde la parte frontal del ala

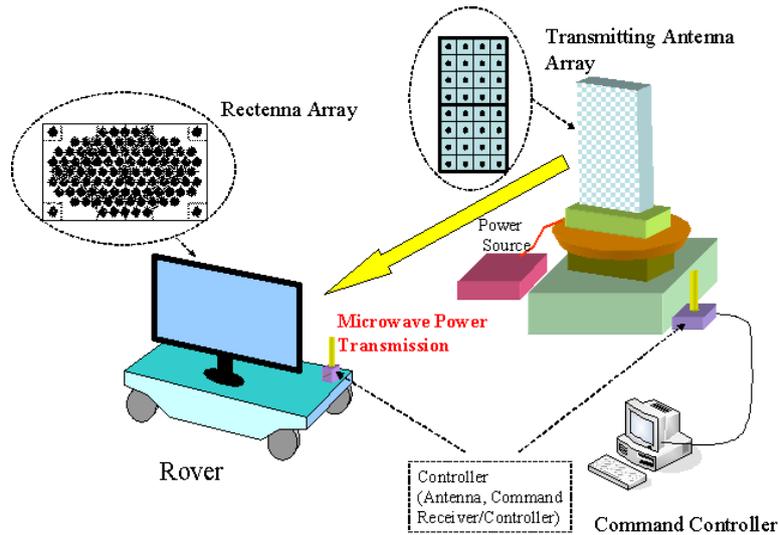
También es posible utilizar la TPM para alimentar un vehículo terrestre, como se muestra en la Fig. 2.6.6. Desde 2004 se desarrolla en Japón una tecnología TPM con una antena activa integrada (AIA) [SHI 07]. El objetivo del proyecto es: 1) desarrollar un transmisor de energía de microondas con AIA y una muy baja relación potencia-peso (objetivo inferior a 50 g/W); 2) mejorar la gestión de la potencia de microondas rectificadas en la rectena, el receptor y el rectificador de la energía de microondas, en particular contra la modificación de la carga conectada; y 3) realizar experimentos fundamentales de la coexistencia de 100 W de microondas y 10 mW de ondas de comunicación inalámbrica. Para el proyecto se escogió la TPM para alimentar un vehículo terrestre en movimiento. El subsistema de transmisión de microondas estaba compuesto por una AIA de 32 elementos con antena Microstrip rectangular con polarización lineal y amplificadores de alta potencia GaA de 3 fases con una salida de 4 W en una base dieléctrica plegada para lograr un área de enfriamiento mayor, cuya potencia total es de 120 W a 5,8 GHz. El sistema no emplea el desplazamiento en fase. En la Fig. 2.6.7 puede verse una fotografía del experimento TPM en una cámara anecoica. El vehículo se movió utilizando únicamente la energía de microondas proporcionada por TPM.

Un grupo de la Universidad Ritsumeikan de Japón llevó a cabo una demostración de TIP con un dron volador en 2015 (Fig. 2.6.8) [NIS 15]. Se utilizó la banda de frecuencias de 430 MHz y una potencia de onda radioeléctrica de unos 30 W para alimentar el dron, que pesaba 25 g y necesitaba 2W CC para volar. En la actualidad, el dron puede volar por encima de una antena transmisora a una altura de unos 10 cm. El sistema está en fase de revisión.

En 2015 un grupo de la Universidad de Colorado, Estados Unidos, e ISAE, Francia, proyectó un sistema TIP para alimentar una microANT (aeronave no tripulada) (Fig. 2.6.9) [Dun 15].

FIGURA 2.6.6

**Sistema experimental de TPM para un vehículo terrestre en movimiento**  
[SHI 07]



Leyenda:

- 1 Matriz de rectenas
- 2 Matriz de antena transmisora
- 3 Fuente de alimentación
- 4 Transmisión de potencia por microondas
- 5 Vehículo
- 6 Controlador (antena, receptor de mando/controlador)
- 7 Controlador de mando

FIGURA 2.6.7

**Fotografía del experimento TPM para vehículo terrestre**  
[SHI 07]

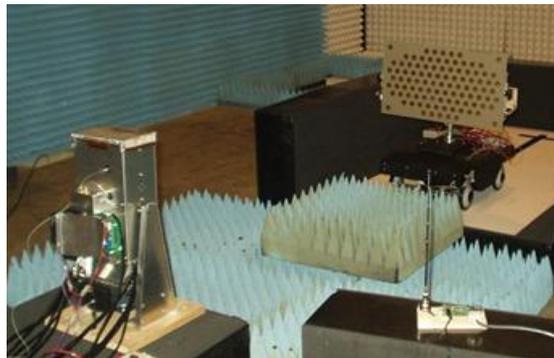
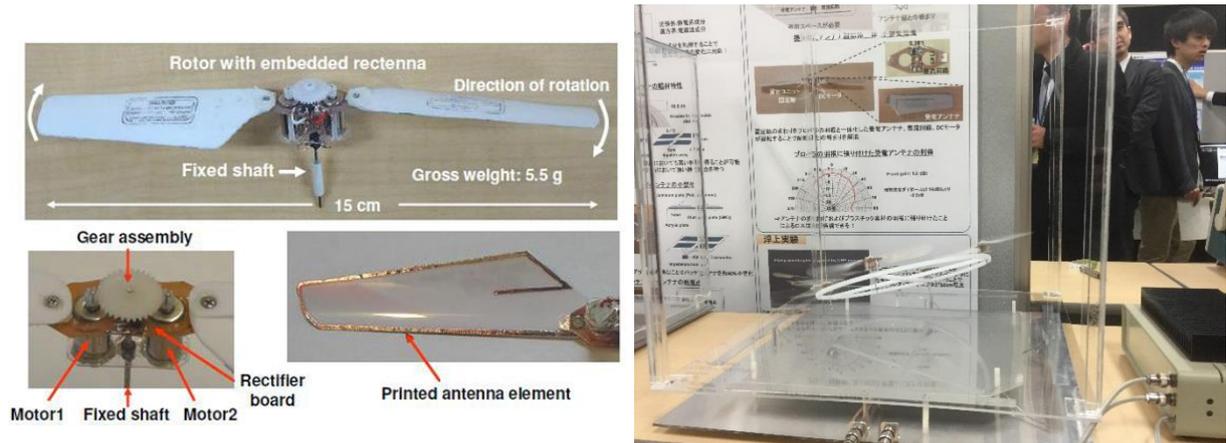


FIGURA 2.6.8

Sistema experimental de TIP para dron volador [NIS 15] y su presentación en Japón (marzo de 2016, Japón)

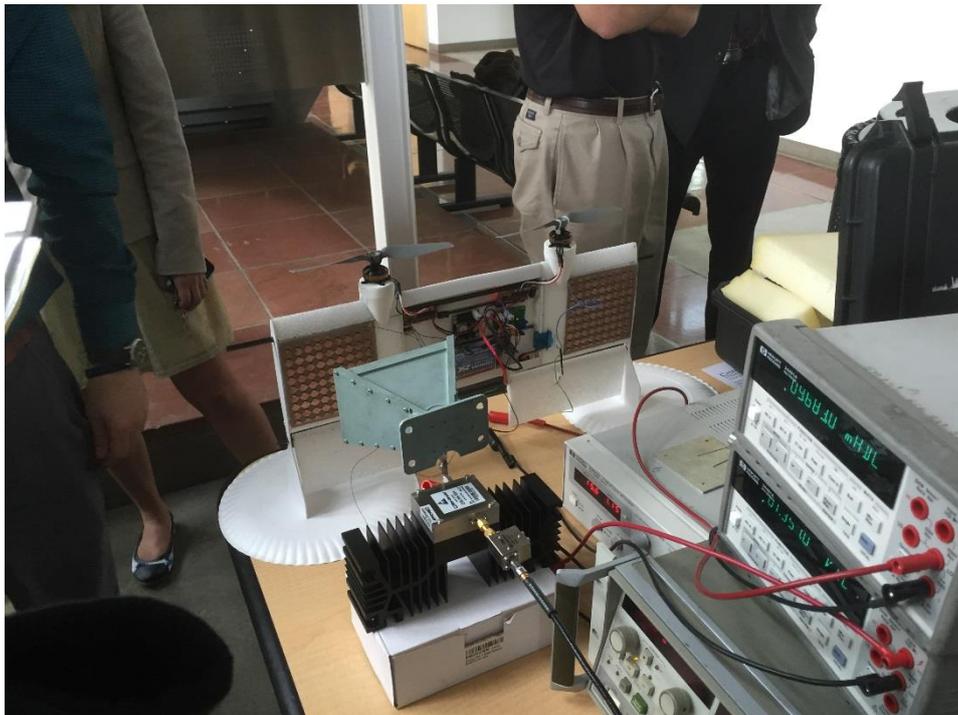


Leyenda:

- 1 Rotor con rectena incorporada
- 2 Dirección de rotación
- 3 Semieje fijo
- 4 Peso bruto
- 5 Ensamblaje del motor
- 6 Motor 1
- 7 Semieje fijo
- 8 Motor 2
- 9 Rectificador
- 10 Antena impresa

FIGURA 2.6.9

Sistema experimental de TIP a microANT



- [DUN 15] Dunbar, S., F. Wenzl, C. Hack, R. Hafeza, H. Esfeer, F. Defay, S. Prothin, D. Bajon, and Z. Popovic, «Wireless Far-Field Charging of a Micro-UAV», *Proc. of IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc)*, T1.2, mayo de 2015.
- [NAG 11] Nagahama, A., T. Mitani, N. Shinohara, N. Tsuji, K. Fukuda, Y. Kanari, and K. Yonemoto, «Study on a Microwave Power Transmitting System for Mars Observation Airplane», *Proc. of 2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2011)*, pp. 63-66, 2011.
- [NAG 12] Nagahama, A., T. Mitani, N. Shinohara, K. Fukuda, K. Hiraoka, and K. Yonemoto, «Auto Tracking and Power Control Experiments of a Magnetron-based Phased Array Power Transmitting System for a Mars Observation Airplane», *Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012)*, pp. 29-32, 2012.
- [NIS 15] Nishikawa, H., Y. Kiani, T. Furukoshi, H. Yamaguchi, A. Tanaka, and T. Douseki, «UHF Power Transmission System for Multiple Small Self-rotating Targets and Verification with Batteryless Quadcopter having Rotors with Embedded Rectenna», *Proc. of IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTc)*, T1.1, mayo de 2015.
- [MYS 12] Miyashiro, K., F. Inoue, K. Maki, K. Tanaka, S. Sasaki, and K. Komurasaki, «Sequentially Rotated Array Antenna for Wireless Power Transmission to an MAV (*en Japonés*)», *IEICE Tech. Report*, WPT2012-30, pp. 59-61, 2012.
- [SHI 07] Shinohara, N., K. Nagano, T. Ishii, S. Kawasaki, T. Fujiwara, S. Nakayama, Y. Takahashi, S. Sasaki, K. Tanaka, Y. Hisada, Y. Fujino, S. Mihara, T. Anzai, and Y. Kobayashi, «Experiment of Microwave Power Transmission to the Moving Rover», *Proc. of Int. Sympo. on Antennas and Propagation (ISAP2007)*, 3B1-1, 2007.

## 2.7 TIP punto a punto (App ID: c2)

Resulta sencillo imaginarse una TIP punto a punto por ondas radioeléctricas para distancias superiores al kilómetro, en lugar de recurrir a los cables eléctricos (Fig. 2.7.1). En la década de 1960 había grandes esperanzas puestas en una TIP punto a punto por microondas que funcionase en distancias superiores al kilómetro. Brown y Dickinson llevaron a cabo experimentos de TIP en JPL en 1975 (Fig. 2.7.2) [BRO 84]. Sin embargo, el tamaño de las antenas transmisora y receptora se calculó en la teoría y resultó ser demasiado grande para poder comercializar una la aplicación TIP punto a punto a un costo razonable como alternativa a los cables eléctricos. Se revisaron los sistemas TPM punto a punto y se realizaron más experimentos en la década de 1990 (Fig. 2.7.3) [SHI 98] [CEL 97]. Su resultado ha sido una matriz de rectenas. En determinadas condiciones, como para alimentar eléctricamente una cima montañosa aislada o una isla, donde el costo de la alimentación por cables resulta demasiado onerosa y/o las necesidades eléctricas son esporádicas, el sistema TIP punto a punto ofrece una clara ventaja con respecto a los cables eléctricos.

FIGURA 2.7.1

Imagen de TIP punto a punto



FIGURA 2.7.2

Experimento de TIP punto a punto de 1 milla con una antena parabólica de 26 m y un Kystron de 450kW-2,388 GHz como transmisor y una matriz de rectenas de  $3,4 \times 7,2$  m como receptor



FIGURA 2.7.3

Experimento de TIP punto a punto en 50 m con un magnetrón de 3 kW-2,45 GHz en Japón (1995)

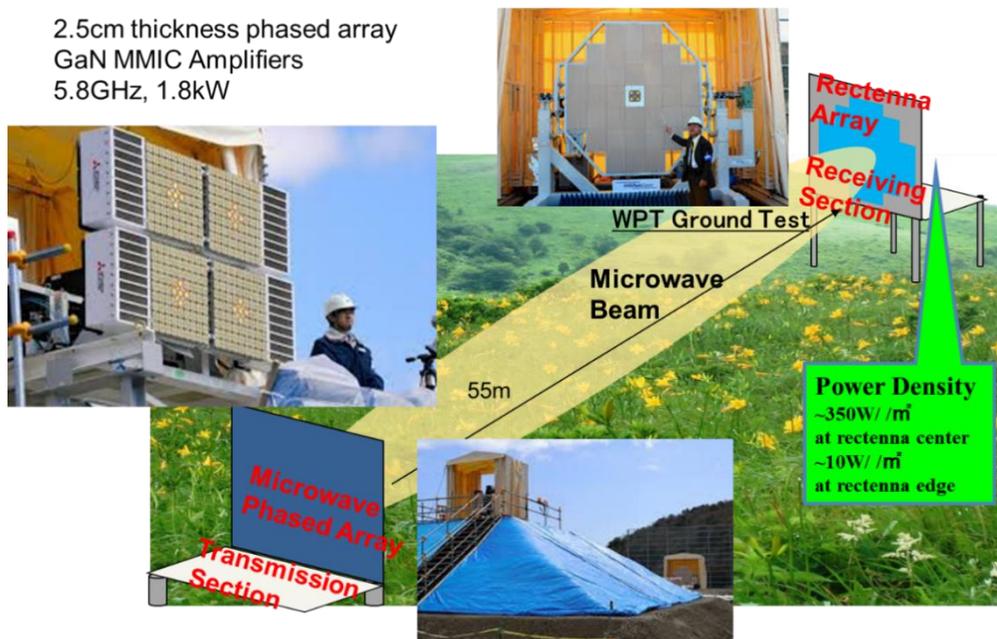


### 2.7.1 Situación en Japón

En febrero de 2015 se llevaron a cabo en Japón dos experimentos de TIP de larga distancia. En el primero la distancia era de 55 m y la TIP se llevó a cabo en la banda de 5,8 GHz con 1,8 kW de microondas (Fig. 2.7.4). Las microondas se transmitieron desde una matriz con control de fase de 2,5 cm de grosor con amplificadores MMIC GaN y controladores de fase MMIC de 5 bits. La eficacia del amplificador de alta potencia GaN es aproximadamente de un 70% a 7W, 5,8 GHz. El delgado sistema de control de fase y los amplificadores GaN fueron fabricados por Mitsubishi Electric Corp y la rectena por IHI Aerospace. En este experimento, se optó por un vector electromagnético rotativo (REV) para la detección rectodirectiva del objetivo a fin de detectar la posición de la rectena y controlar el haz de microondas. El sistema de detección del objetivo y de conformación del haz fue obra de JAXA y Mitsubishi Electric Corp. En el otro experimento de TIP de larga distancia, ésta era de 500 m y se llevó a cabo en la banda 2,45 GHz con 10 kW transmitidos desde un magnetrón con control de fase de Mitsubishi Heavy Industries (Fig. 2.7.5). JSS (Japan Space Systems) con el apoyo del METI (Ministerio de Economía, Comercio e Industria) llevó a cabo ambos experimentos, que fueron el resultado de un proyecto de I+D de seis años para un satélite alimentado por energía solar. El de I+D del METI sigue adelante en 2017.

FIGURA 2.7.4

Experimento de TPM punto a punto en 55 m con control de fase de 1,8 kW-5,8 GHz y amplificadores MMIC GaN de JSS y METI, Japón (2015)

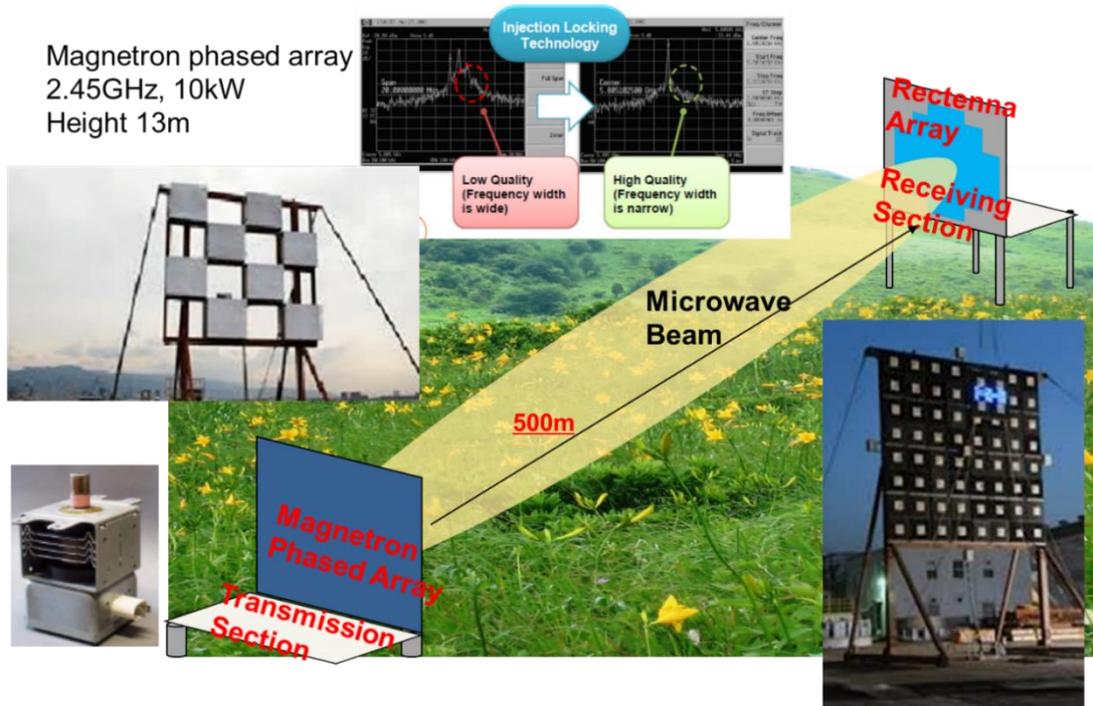


Leyenda:

- 1 Sistema de control de fase de 2,5 cm de grosor  
Amplificadores MMIC GaN
- 2 Matriz de rectenas
- 3 Estación receptora
- 4 Prueba de TIP in situ
- 5 Haz de microondas
- 6 Sistema de microondas con control de fase
- 7 Sección de transmisión
- 8 Densidad de potencia  
en el centro de la rectena  
en el borde de la rectena

FIGURA 2.7.5

Experimento de TPM punto a punto en 500 m con un magnetrón de 10 kW-2,45 GHz con control de fase de JSS y METI, Japón (2015)

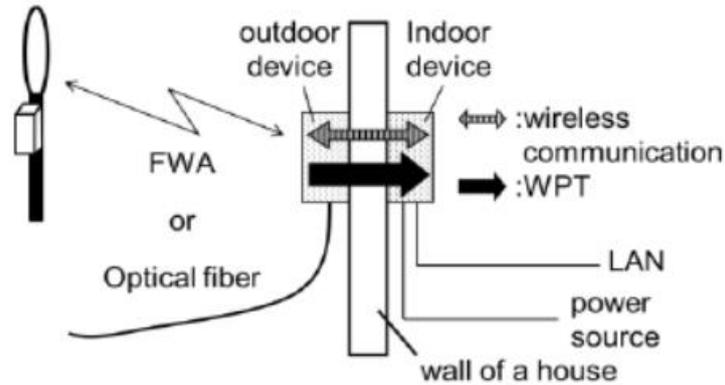


Leyenda:

- 1 Magnetrón con control de fase  
2,45 GHz, 10 kW  
Altura 13 m
- 2 Tecnología de bloqueo de inyección
- 3 Baja calidad  
(ancho de frecuencia amplio)
- 4 Alta calidad  
(ancho de frecuencia estrecho)
- 5 Matriz de rectena
- 6 Sección receptora
- 7 Haz de microondas
- 8 Magnetrón con control de fase
- 9 Sección de transmisión

El tamaño de la antena y el costo de un sistema TPM dependen de la distancia para la que se vaya a utilizar. En Japón, NTT Corp. y la Universidad de Kyoto presentaron un sistema TIP punto a punto de corta distancia, denominado TPM para acceso fijo inalámbrico (FWA). En la Fig. 2.7.6 se muestra el sistema presentado [HAT 12]. El dispositivo exterior se comunica con Internet por FWA o fibra óptica. El dispositivo interior y el dispositivo exterior se comunican inalámbricamente. El dispositivo interior transmite energía de microondas al dispositivo exterior. El dispositivo exterior puede funcionar sin batería. Para este sistema se prefirió transportar la información y la energía por la misma portadora de microondas para reducir el tamaño del sistema. En un primer momento se eligió la frecuencia de 24 GHz y se creó una rectena MMIC con filtro de salida de carga de clase F, como se muestra en la Fig. 4.5.18 [HAT 13].

FIGURA 2.7.6  
Concepto de sistema FWA por microondas  
[HAT 12]



Leyenda:

- 1 Dispositivo exterior
- 2 Dispositivo interior
- 3 FWA o fibra óptica
- 4 Comunicación inalámbrica
- 5 TIP
- 6 Fuente de alimentación
- 7 Muro de una casa

En 2015 un grupo de la Universidad de Kyoto y MHI preparó un sistema de carga inalámbrica para un pequeño vehículo eléctrico con 100 W de microondas a 2,45 GHz (Fig. 2.7.7). Se trata de un sistema TIP punto a punto de corta distancia. El 2016 se estaba estudiando el sistema TIP para su uso cotidiano en la Universidad de Kyoto.

FIGURA 2.7.7  
Sistema de carga inalámbrica para un pequeño vehículo eléctrico



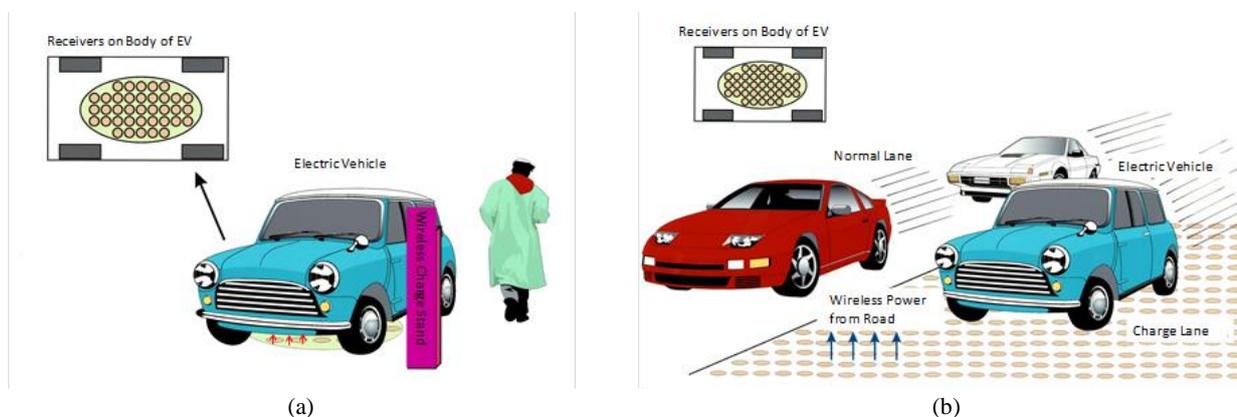
- [BRO 84] Brown, W.C., «The History of Power Transmission by Radio Waves», *IEEE Trans. MTT*, Vol. 32, No. 9, pp. 1230-1242, 1984.
- [SHI 98] Shinohara N. and H. Matsumoto, «Dependence of dc Output of a Rectenna Array on the Method of Interconnection of Its Array Element», *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 125, No. 1, pp. 9-17, 1998.
- [CEL 97] Celeste, A., J-D. L.S. Luk, J.P. Chabriat, and G. Pignolet, «The Grand-Bassin Case Study: Technical Aspects», *Proc. of SPS'97*, pp. 255-258, 1997.
- [HAT 12] Hatano, K., N. Shinohara, T. Mitani, T. Seki, and M. Kawashima, «Development of Improved 24 GHz-Band Class-F Load Rectennas», *Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012)*, pp. 163-166, 2012.
- [HAT 13] Hatano, K., N. Shinohara, T. Seki, and M. Kawashima, «Development of MMIC Rectenna at 24 GHz», *Proc. of 2013 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS)*, pp. 199-201, 2013.

### 2.8 Carga inalámbrica de vehículos eléctricos (App ID: c3)

Puede lograrse una TPM muy eficaz no sólo mediante guíaondas cerrados, sino también en distancias cortas con antenas más pequeñas. En la Fig. 2.8.1 se muestran fotografías de la carga inalámbrica por TPM de vehículos eléctricos. Conviene utilizar la TPM para la carga inalámbrica tanto de VE aparcados como en movimiento porque las antenas transmisora y receptora no están acopladas. La impedancia de las antenas no varía por el campo de posición del VE, como tampoco se modifica la eficacia de la TPM. Los problemas de seguridad e interferencia de microondas se reducen tanto para la TPM por guíaondas como en distancias cortas al no haber prácticamente ninguna difusión de microondas imprevistas. En los sistemas de transferencia de potencia en distancias cortas, la magnitud de la potencia inalámbrica puede asimismo aumentar hasta la gama de kW porque la transmisión no interactúa con las personas ni otros seres vivos entre las antenas transmisora y receptora.

FIGURA 2.8.1

Imágenes de la carga inalámbrica de VE  
(a) aparcados y (b) en movimiento



Leyenda:

- 1 Receptores en el cuerpo del VE
- 2 Vehículo eléctrico

- 3 Carril normal
- 4 Carril de carga
- 5 Potencia inalámbrica desde la carretera

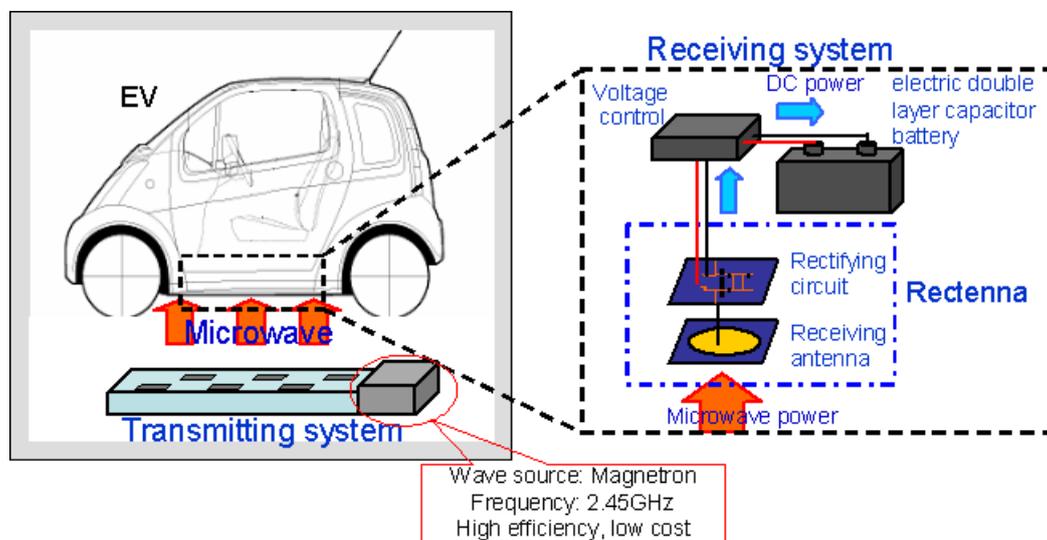
### 2.8.1 Situación en Japón

Se ha ideado y materializado un sistema de TPM para VE (Fig. 2.8.2) [SHI 04]. Entre 2003 y 2008 un proyecto de investigación colaborativa entre un constructor de automóviles japonés y una Universidad logró desarrollar un sistema TPM entre la carretera y el cuerpo del VE utilizando una frecuencia de microondas de 2,45 GHz (Fig. 2.8.3) [SHI 11] [SHI 11-2]. Se utilizaron magnetrones y antenas de ranura para reducir el costo del sistema. La distancia entre las antenas transmisora y receptora era de unos 12,5 cm con una distancia de  $1 \lambda$  a 2,45 GHz. La batería del vehículo eléctrico puede cargarse efectivamente mediante la transmisión de microondas con una eficacia del haz teórica mínima del 83,7% y una eficacia experimental mínima del 76,0% [SHI 11-2]. Esta eficacia es suficientemente elevada para lograr la transmisión de potencia inalámbrica con microondas. Para esta aplicación se utilizó un nuevo diodo Schottky GaN a fin de aumentar la potencia rectificadora y reducir el tiempo de carga del VE.

En 2000 se creó un modelo de TPM a escala para la alimentación de VE [SHI 04]. A fin de reducir la pérdida de potencia, se detectó la posición del VE modelo utilizando posicionando sensores y la transmisión de microondas se efectuó únicamente a la posición en que se encontraba el VE modelo.

FIGURA 2.8.2

Sistema de carretera para la carga inalámbrica por microondas a corta distancia de VE [SHI 04]

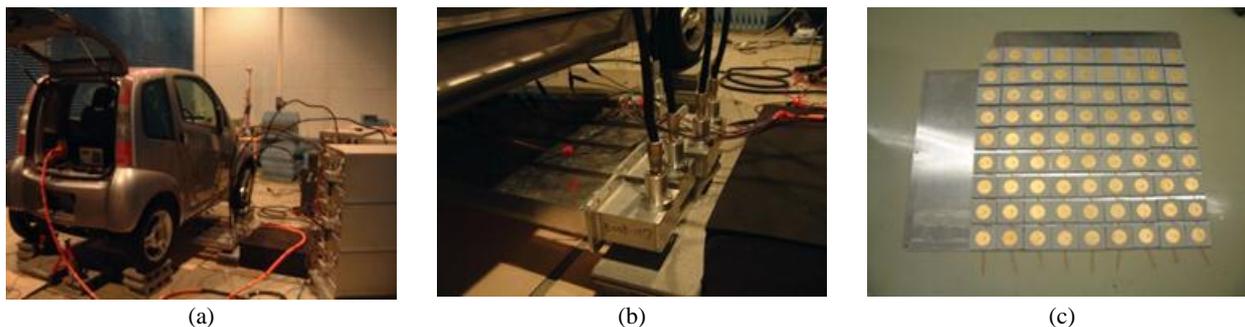


Leyenda:

- 1 VE
- 2 Microondas
- 3 Sistema transmisor
- 4 Fuente de radiación: magnetrón  
Frecuencia: 2,45 GHz  
Alta eficacia, bajo costo
- 5 Sistema receptor
- 6 Control de tensión
- 7 Electricidad CC
- 8 Batería condensador eléctrico de doble capa
- 9 Rectena
- 10 Circuito rectificador
- 11 Antena receptora
- 12 Energía de microondas

FIGURA 2.8.3

Experimento de carga inalámbrica por microondas de la Universidad de Kyoto:  
(a) el sistema, (b) antena transmisora de microondas en la carretera,  
(c) matriz de rectena en el cuerpo del VE [SHI 11-2]



Entre 2006 y 2008 una empresa japonesa dirigió un proyecto de I+D de TPM para VE con tres fabricantes de coches japoneses [SHI 13-2]. Para reducir la pérdida de potencia, se utilizaron: 1) 6,6 kV CC para alimentar los magnetrones a 2,45 GHz como transmisores de microondas; 2) una pared de bloqueo perimetral que las microondas pueden atravesar entre las antenas receptora y transmisora; y 3) un sistema de reciclaje térmico. La eficacia total, incluido el reciclaje térmico, fue de aproximadamente el 38% con una potencia de salida de 1 kW a una distancia de 12,5 cm. El prototipo presentado en 2009 puede verse en la Fig. 2.8.4.

En 2012 la sucursal japonesa de un fabricante de coches sueco y una empresa japonesa empezaron a desarrollar un nuevo sistema TPM para camiones eléctricos. El antiguo sistema causaba problemas de acoplamiento entre las antenas receptora y transmisora, porque la distancia era demasiado corta. Así, se modificó el nuevo sistema pasándose de una configuración carretera-carrocería a una configuración al techo (Fig. 2.8.5) [SHI 13-1] [SHI 13-3] para utilizar la TPM como TIP de larga distancia. La distancia entre las antenas transmisora y receptora en el techo del VE era de 2-6 m, en función del VE utilizado. Para conservar una alta eficacia en distancias variables, se creó un sistema con control de fase que puede crear un haz plano en las antenas receptoras.

El 6 de julio de 2012 se presentó una matriz de rectena de 10 kW con una eficacia del 84% a una frecuencia de 2,45 GHz para el sistema TIP de distancia media (Fig. 2.8.6) [FUR 13]. La densidad de potencia de microondas recibida superaba los 3,2 kW/m<sup>2</sup> a una distancia de unos 4 m del transmisor.

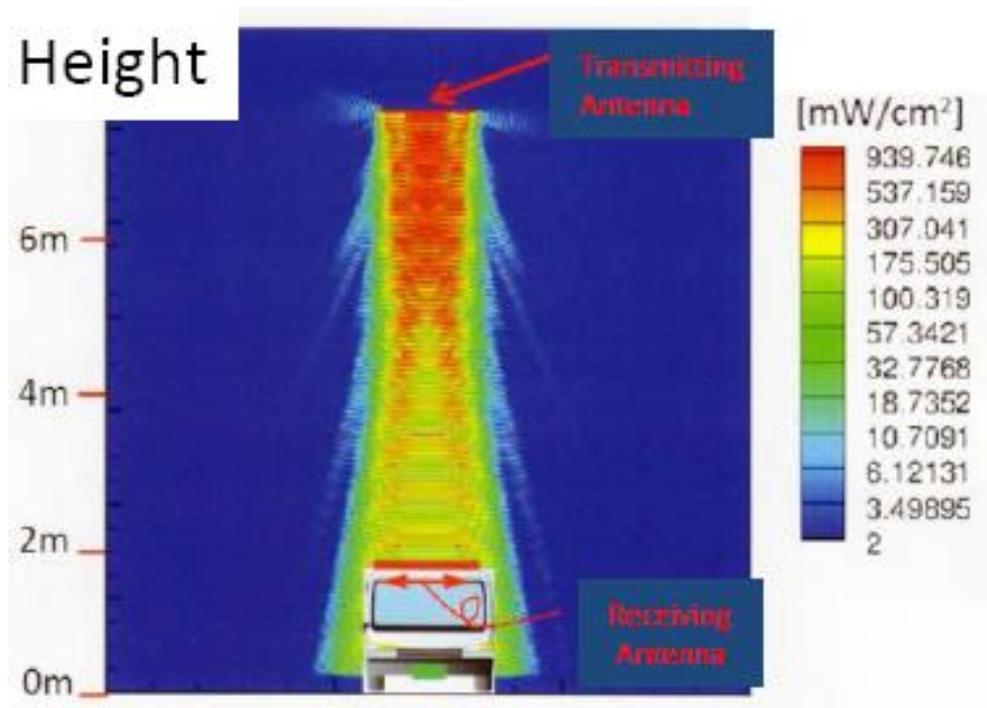
FIGURA 2.8.4

Experimento de carga inalámbrica por microondas  
del Grupo Mitsubishi Heavy Industries en 2009  
[SHI 13-2]



FIGURA 2.8.5

Carga inalámbrica de media distancia para VE  
y simulación FDTD del haz de microondas  
[SHI 13-1]



Leyenda:

- 1 Altura
- 2 Antena transmisora
- 3 Antena receptora

FIGURA 2.8.6

Fotografía de la rectena de 10 kW a 2,45 GHz para la carga inalámbrica de VE  
[FUR 13]



- [FUR 13] Furukawa, M., T. Minegishi, T. Ogawa, Y. Sato, P. Wang, H. Tonomura, M. Teramoto, and N. Shinohara, «Wireless Power Transmission to 10 kW Output 2.4 GHz-band Rectenna Array for Electric Trucks Application (en japonés)», *IEICE Tech. Report*, WPT2012-47, pp. 36-39, 2013.
- [SHI 04] Shinohara, N. and H. Matsumoto, «Wireless Charging System by Microwave Power Transmission for Electric Motor Vehicles (en japonés)», *IEICE Trans. C*, Vol.J87-C, No. 5, pp. 433-443, 2004.
- [SHI 11] Shinohara, N., «Beam Efficiency of Wireless Power Transmission via Radio Waves from Short Range to Long Range», *Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 10, No. 4, pp. 224-230, 2011.
- [SHI 11-2] Shinohara, N., «Wireless Charging System of Electric Vehicle with GaN Schottky Diodes», *Proc. of Int. Microwave Sympo. (IMS) Workshops*, WFA «Wireless Power Transmission», 2011.
- [SHI 13] Shinohara, N. and Yuta Kubo, «Suppression of Unexpected Radiation from Microwave Power Transmission System toward Electric Vehicle», *Proc. of 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, E3-4 (No. 290450), 2013.
- [SHI 13-2] Shinohara, N., «Wireless Power Transmission Progress for Electric Vehicle in Japan», *Proc. of 2013 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS)*, pp. 109-111, 2013.
- [SHI 13-3] Shinohara, N., Y. Kubo, and H. Tonomura, «Mid-Distance Wireless Power Transmission for Electric Truck via Microwaves», *Proc. of 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory (EMT-S2013)*, pp. 841-843, 2013.

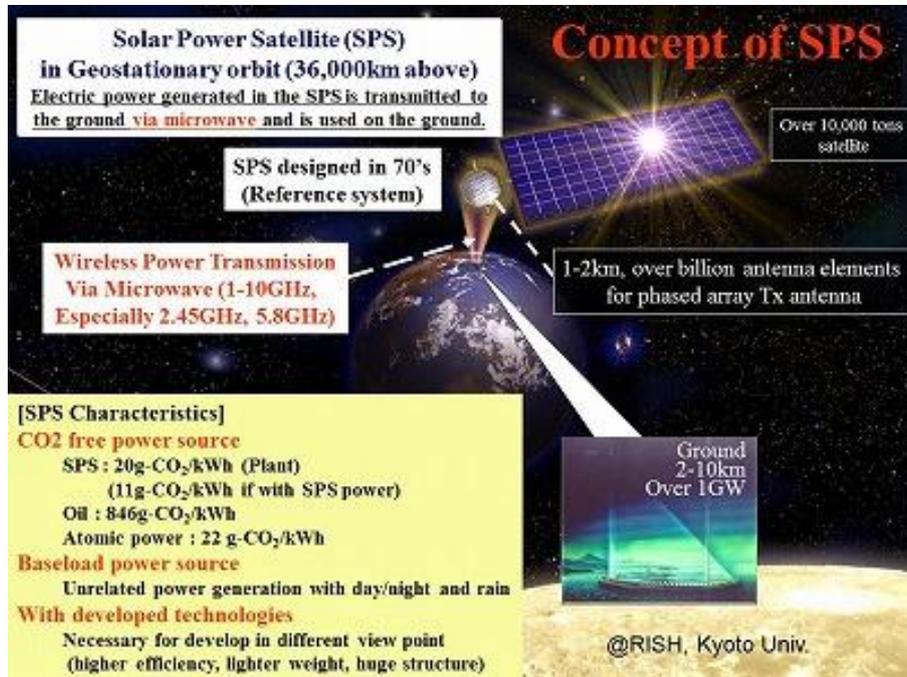
## 2.9 Satélite de energía solar (App ID: c4)

La mayor aplicación de TIP por ondas radioeléctricas es un satélite de energía solar (SPS) [SPS 07]. El SPS está diseñado como un enorme satélite de energía solar en la órbita de los satélites geoestacionarios a 36 000 km de la superficie de la Tierra (Fig. 2.9.1), donde no hay nubes ni noche en ningún momento del año. La energía generada en el SPS se transmite a tierra por microondas. Según los cálculos teóricos, para lograr una alta eficacia de haz a una distancia tan grande, se necesitan grandes antenas de unos 2 km en la banda de 5,8 GHz, lo que no es imposible de lograr. La energía de microondas no sufre absorción por el aire, las nubes o la lluvia, por lo que es posible lograr con el SPS y la tecnología TPM unas diez veces la energía solar, que es una fuente de energía estable y sin emisiones de CO<sub>2</sub>, que se consigue con las tecnologías terrestres.

Para el sistema TPM del SPS debe utilizarse un enorme sistema con control de fase de elevada eficacia. El control de fase es necesario para dirigir el haz de potencia a una pequeña rectena en tierra con una tolerancia de 0,0005 grados, aunque la antena transmisora del SPS siempre estará en movimiento y fluctuante. El haz de potencia debe generarse y transmitirse sin demasiadas pérdidas por motivos económicos.

FIGURA 2.9.1

Imagen del satélite de energía solar



Leyenda:

- 1 Satélite de energía solar (SPS) en la órbita de los satélites geoestacionarios (a 36 000 km de altitud) La energía eléctrica generada en el SPS se transmite al suelo por microondas y se utiliza en tierra
- 2 SPS diseñado en los años 70 (sistema de referencia)
- 3 Transmisión inalámbrica de potencia por microondas (1-10 GHz, en particular 2,45 GHz, 5,8 GHz)
- 4 [Características del SPS]  
Fuente de energía sin emisiones de CO<sub>2</sub>  
(Planta)  
(...si se alimenta con energía del SPS)  
Carburante  
Energía atómica  
Fuente de energía básica  
Generación eléctrica indiferente al día/noche y la lluvia  
Con tecnologías evolucionadas  
Necesarias para el desarrollo desde distintas perspectivas (mayor eficacia, menor peso, enorme estructura)
- 5 Concepto del SPS
- 6 Satélite de más de 10 000 toneladas
- 7 1-2 km, antena transmisora con control de fase con más de mil millones de elementos
- 8 Tierra 2-10 km sobre IGW

[SPS 07] Report of the URSI Inter-Commission Working Group on SPS, URSI, 2007, available at URL:  
<http://www.ursi.org/files/WhitePapers/WSPSPS-ReportMin.pdf>

### 3 Tecnologías empleadas en las aplicaciones TIP

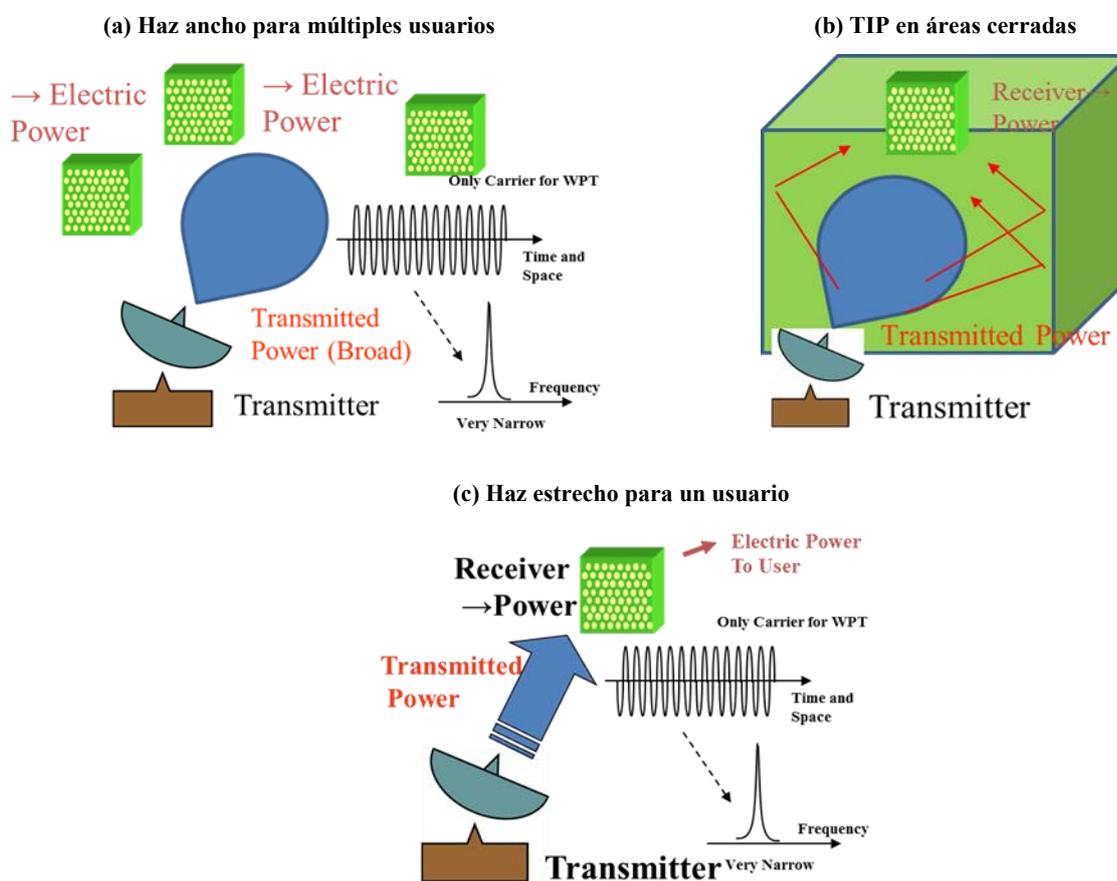
En un sistema de TIP por ondas radioeléctricas se utilizan antenas para transmitir y recibir las ondas. Las antenas transmisora y receptora no tienen acoplamiento electromagnético, por lo que los transmisores y receptores no tienen que ajustarse a los parámetros de circuito. La principal base teórica de la TIP por haces de ondas radioeléctricas es la fórmula de transmisión de Friis. A diferencia de lo que ocurre en los sistemas de comunicación inalámbrica, no es necesario modular la onda radioeléctrica que transmite inalámbricamente la potencia.

La TIP por haces de ondas radioeléctricas se clasifica de la siguiente manera (Fig. 3.1 y Cuadro 3.1):

- a) Haz ancho para múltiples usuarios en distancias cortas.
- b) TIP en áreas cerradas.
- c) Haz estrecho para un usuario en distancias cortas/largas.

FIGURA 3.1

#### TIP por haces de ondas radioeléctricas



Leyenda:

- 1 Energía eléctrica
- 2 Portadora única para TIP
- 3 Tiempo y espacio
- 4 Potencia transmitida (ancho)
- 5 Transmisor
- 6 Frecuencia
- 7 Muy estrecha
- 8 Receptor
- Potencia
- 9 Potencia transmitida

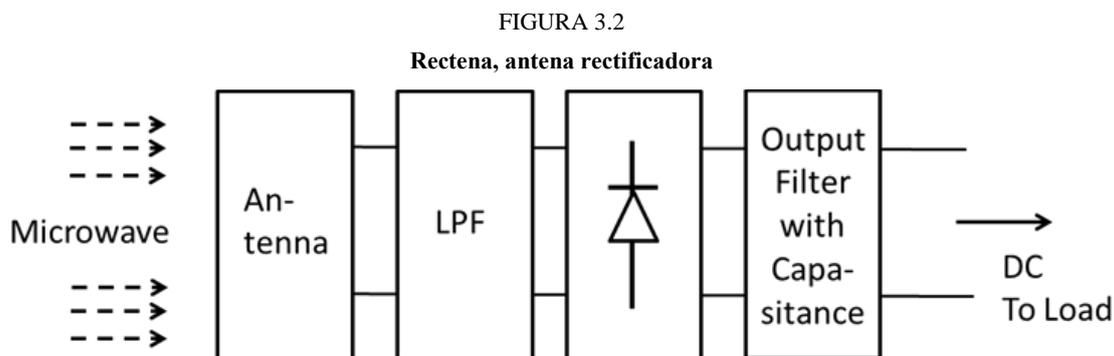
CUADRO 3.1

**Clasificación de las aplicaciones de TIP**

<b>ID</b>	<b>Aplicación</b>	<b>a) Haz ancho para múltiples usuarios en distancias cortas</b>	<b>b) TIP en áreas cerradas</b>	<b>c) Haz estrecho para un usuario en distancias cortas/largas</b>
a1	Red de sensores con alimentación inalámbrica	○		
a2	Cargador inalámbrico de dispositivos móviles	○		
b1	Hoja de transferencia inalámbrica de potencia		○	
b2	TPM por tubos		○	
b3	Edificios de microondas		○	
c1	TIP a objetos en movimiento/volantes			○
c2	TIP punto a punto			○
c3	Carga inalámbrica de vehículos eléctricos			○
c4	SPS			○

En la TIP de haz estrecho y la TIP en áreas cerradas se puede suprimir la radiación imprevista en el espaciado gracias a la tecnología de antena. En ocasiones se utilizan para la TIP de haz estrecho antenas con control de fase, que permiten controlar la dirección del haz y conformarlo mediante varias antenas controladas en fase y amplitud. Se han creado antenas con control de fase para TIP, que se han probado en condiciones reales [SHI 13].

Las ondas radioeléctricas son en sí energía eléctrica. La única diferencia entre las ondas radioeléctricas y la electricidad reside en la frecuencia. Para la TIP por haces de ondas radioeléctricas, la comunicación inalámbrica y la teledetección se utilizan ondas de la gama MHz-GHz. La CC o 50/60 Hz (electricidad comercial) se utiliza como electricidad. Así, para la TIP sólo se necesita convertir las frecuencias radioeléctricas en CC/frecuencias eléctricas comerciales. Y esto ocurre no sólo en la TIP por haces de ondas radioeléctricas, sino también en la TIP por inducción y la TIP por acoplamiento resonante. En la TIP por ondas radioeléctricas se utiliza una rectena, antena con circuito rectificador con diodos, como receptor y un rectificador (Fig. 3.2). La eficacia de la conversión RF-CC de la rectena creada era cercana al 90% a 2,45 GHz [BRO 80] [FUR 13] y del 80% a 5,8 GHz [MCS 97]. La rectena puede utilizarse para la TIP con todo tipo de ondas radioeléctricas, por ejemplo, ondas decimétricas [SAM 09], banda X [EPP 00], banda K [TAK 13], y banda W [WEI 14].



Leyenda:

- 1 Microonda
- 2 Antena
- 3 Filtro de salida con condensador
- 4 CC a carga

- [BRO 80] Brown, W.C., «The History of the Development of the Rectenna, *Proc. of SPS microwave systems workshop*, pp. 271-280, Jan. 15-18, 1980, at JSC-NASA.
- [EPP 00] Epp, L.W., A.R. Khan, H.K. Smith, and R.P. Smith, «A compact dual polarized 8.51 GHz-rectenna for high-voltage (50 V) actuator applications», *IEEE Trans. MTT*, Vol. 48, No. 1, pp. 111-119, 2000.
- [FUR 13] Furukawa, M., T. Minegishi, T. Ogawa, Y. Sato, P. Wang, H. Tonomura, M. Teramoto, and N. Shinohara, «Wireless Power Transmission to 10 kW Output 2.4 GHz-band Rectenna Array for Electric Trucks Application (*en japonés*)», *IEICE Technical Report*, WPT2012-7, pp. 36-39, 2013.
- [MCS 97] McSpadden, J.O., L. Fun, and K. Chang, «A High Conversion Efficiency 5.8 GHz Rectenna», *IEEE MTT-S Digest*, pp. 547-550, 1997.
- [SAM 09] Sample, A.P. and J.R. Smith, «Experimental Results with two Wireless Power Transfer Systems», *Proc. of 2009 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS)*, MO2A-5, pp. 16-18, 2009.
- [SHI 13] Shinohara, N., «Beam Control Technologies with a High-Efficiency Phased Array for Microwave Power Transmission in Japan», *Proceeding of IEEE*, vol. 101, Issue 6, pp. 1448-1463, 2013.
- [TAK 13] Takacs, A., H. Aubert, L. Despoisse, and S. Fredon, «K-band Energy Harvesting for Satellite Application», *Proc. of Int. Microwave Sympo. (IMS)*, WE3G-1, 2013.
- [WEI 14] Weissman, N., S. Jameson and E. Socher, «W-Band CMOS On-Chip Energy Harvester and Rectenna», *Proc. of Int. Microwave Sympo. 2014*, TH2C-5, 2014.

#### 4 Organizaciones cuya contribución a la normalización de la TIP está prevista

Aunque no hay una organización de normalización dedicada a la TIP por ondas radioeléctricas, algunas fomentan la TIP y se espera que contribuyan a su normalización.

##### 4.1 Europa

###### WiPE (Transmisión Inalámbrica de Potencia para la Electrónica Sostenible) [W13]

[W13] <http://www.cost-ic1301.org/>

COST es desde 1971 el marco intergubernamental para la cooperación europea en investigación científica y técnica. Su objetivo es aumentar la competitividad de la investigación científica y técnica con fines pacíficos en Europa.

COST está trabajando en circuitos y sistemas de TIP y en estrategias diseñadas especialmente para sistemas sin batería. Los sensores sin batería, la RFID pasiva y las comunicaciones en el campo cercano (NFC) son conceptos estrechamente relacionados que utilizan la TIP y sistemas de recuperación de energía para alimentar a distancia dispositivos móviles o cargar baterías a distancia, contribuyendo así al desarrollo y la evolución de la Internet de las cosas (IoT).

En este contexto, COST reúne a diseñadores de circuitos y sistemas RF de distintos horizontes para: 1) crear mejores circuitos y subsistemas para aumentar la eficacia de la TIP; y 2) investigar la utilización de nuevos materiales y tecnologías a fin de minimizar los costos y maximizar la integración de la electrónica en el medioambiente y en aplicaciones definidas.

Los beneficios de esta actividad incluyen la creación de una amplia red de expertos, tanto de instituciones académicas como de la industria, que pueda afrontar los retos existentes y por venir en materia de TIP de manera interdisciplinaria, allanando el camino para las futuras generaciones de soluciones TIP y su reglamentación.

COST es el marco ideal para aunar esfuerzos a escala internacional y crear en Europa una comunidad científica e industrial de primer orden dedicada a la TIP.

El Comité de Gestión de WiPE está compuesto por 27 países europeos y cuenta en este momento con la participación de más de 100 entidades en sus reuniones periódicas y talleres. WiPE organiza, además, cursos de doctorado sobre TIP.

WiPE tiene cinco grupos de trabajo (GT) de investigación:

GT 1: Sistemas TIP en el campo lejano

GT 2: Sistemas TIP en el campo cercano

GT 3: Nuevos materiales y tecnologías

GT 4: Aplicaciones (espacio, sanidad, agricultura, sistemas de automoción, electrodomésticos)

GT 5: Reglamentación y repercusión social.

## 4.2 Japón

### 4.2.1 WiPoT (Consorcio de transferencia inalámbrica de potencia para aplicaciones prácticas) [WI]

[WI] <http://www.wipot.jp/english/>

Los objetivos del consorcio son: 1) la adaptación de nuevas ideas y soluciones a las necesidades sociales en lo que respecta a las tecnologías TIP, en particular TPM; y 2) la aceleración del desarrollo de aplicaciones prácticas de TIP. Para lograr esos objetivos WiPoT comparte información, no sólo tecnológica, sino también sobre normalización, seguridad y necesidades del usuario. El Consorcio también da a conocer en todo el mundo las tecnologías de TIP, incluida la TPM. El Consorcio se creó en 2013 y en mayo de 2016 estaba compuesto por 29 empresas, 38 universidades y 3 institutos.

El Consorcio considera que la transmisión de potencia por microondas puede ser la tecnología básica de toda la transmisión inalámbrica de potencia y tiene los siguientes grupos de trabajo:

GT 1: Aplicaciones de haz ancho y baja potencia

GT 2: Aplicaciones de haz estrecho y alta potencia

GT 3: TIP en áreas cerradas

GT 4: Comercialización

GT 5: Normalización.

#### 4.2.2 BWF (Foro de la banda ancha inalámbrica) [BWF]

[BWF] <http://bwf-yrp.net/english/>

El objetivo del Foro es contribuir a la evolución coherente de nuevos sistemas y servicios de radiocomunicaciones para fomentar la pronta comercialización y el desarrollo internacional de sistemas y servicios que utilizan nuevas tecnologías de radiocomunicaciones. Para ello el Foro lleva a cabo proyectos de I+D e investigaciones, recopila información y se coordina con las organizaciones afines, participa en actividades divulgativas, etc., en relación con las nuevas tecnologías de radiocomunicaciones. El 11 de enero de 2013 contaba con 128 miembros.

Sus actividades son las siguientes:

- 1) I+D de nuevas tecnologías de radiocomunicaciones utilizando bancos de pruebas.
- 2) Investigación sobre nuevas tecnologías de radiocomunicaciones.
- 3) Recopilación, intercambio y facilitación de información sobre nuevas tecnologías de radiocomunicaciones.
- 4) Coordinación con organizaciones interesadas en las nuevas tecnologías de radiocomunicaciones.
- 5) Divulgación e información sobre nuevas tecnologías de radiocomunicaciones.
- 6) Otras actividades necesarias para lograr el objetivo del Foro.

El Subcomité de aplicación tecnológica tiene un Grupo de Trabajo sobre transmisión inalámbrica de potencia.

El Subgrupo 5 del Grupo de Trabajo TIP del BWF asume la responsabilidad de elaborar normas técnicas sobre TIP por microondas utilizando los protocolos de redacción de ARIB (Asociación de Industrias y Empresas de Radiocomunicaciones). Un proyecto de norma preparado por BWF se enviará a ARIB para su aprobación.

#### 4.3 Otras organizaciones internacionales

La IEEE MTT (Teoría y Técnica de Microondas) Society está fomentando la transmisión inalámbrica de energía o potencia y las tecnologías de conversión, con técnicas de campo cercano o de campo lejano, para plataformas de acceso fijo o móvil. Para ello creó en el Comité Técnico 26, denominado Wireless Energy Transfer and Conversion in MTTs [TC26]. La obtención inalámbrica de energía de fuentes radioeléctricas (RF) también es objeto de interés de este Comité. El Simposio Internacional sobre Microondas (IMS) acoge desde 2012 un concurso de diseño para estudiantes. En el IMS2014 participaron en el concurso 15 equipos de 12 países. El TC26 organiza desde 2013 una conferencia internacional, la Wireless Power Transfer Conference (WPTc), que empezó siendo un taller en 2011 y volvió a celebrarse en 2012. El número de contribuciones a esta conferencia fue superior a 170 en 2015.

La URSI (Unión Internacional de Ciencias Radioeléctricas) está compuesta por 10 comisiones. La URSI creó el Grupo de Trabajo Intercomisiones (ICWG) sobre el SPS, que es una aplicación de TPM, y en 2007 publicó un documento al respecto en cooperación con todas las comisiones, incluidas las que estudian los sistemas SPS, las tecnologías radioeléctricas y la TPM, así como la interferencia electromagnética, la radioastronomía y las cuestiones de seguridad. La URSI celebra sus asambleas generales (AG) cada tres años y éstas comprenden sesiones dedicadas al SPS o la TIP desde 2002 (hasta 2014, por el momento). En la AG de URSI de 2014 se impartió una conferencia sobre la obtención de energía radioeléctrica y TIP.

[TC 26] IEEE MTTs TC-26 <http://www.mtt-archives.org/~mtt26/>

## 5 Situación del espectro para la TIP por haces de ondas radioeléctricas

Una de las bandas de frecuencias previstas para la TIP es la banda ISM (industrial, científica y médica). Dado que las señales TIP no transportan contenido en forma de signos, señales o imágenes, no puede considerarse que sea un servicio de radiocomunicaciones convencional.

Generalmente la banda ISM 902-928 MHz (sólo en la Región 2) no es adecuada, excepto para aplicaciones TIP de corto alcance, como las redes de sensores con alimentación inalámbrica y FAU. Las bandas ISM 2,4-2,5 GHz y 5,725-5,875 GHz se han utilizado para los experimentos de TIP y se prevén para aplicaciones TIP de haz estrecho. La banda ISM 2,4-2,5 GHz es más conveniente que otras bandas superiores porque plantea menos problemas de propagación. Para las aplicaciones en que los fallos de transmisión debidos a la lluvia, etc. puede paliarse con, por ejemplo, sistemas de alimentación alternativos de reserva o un almacenamiento energético adecuado, resulta conveniente la banda ISM 5,725-5,875 GHz dada la reducción de las aperturas.

En el Anexo 1 a la Recomendación UIT-R SM.1056 la transferencia de potencia se considera una futura aplicación ISM. Sin embargo, de las disposiciones del Reglamento de Radiocomunicaciones aplicables a ISM se desprende que la definición y designación de las bandas de frecuencias para ISM probablemente no se hicieron pensando en la transmisión inalámbrica de potencia.

## 6 Resumen

En este Informe se presentan las posibles aplicaciones de TIP por haces de ondas radioeléctricas, las tecnologías empleadas en esas aplicaciones y las bandas de frecuencias candidatas.

Las redes de sensores con alimentación inalámbrica, los cargadores inalámbricos de dispositivos móviles, las hojas TIP, la TPM por tubos, los edificios de microondas, la TIP a objetos en movimiento/volantes, la TIP punto a punto, la carga inalámbrica de vehículos eléctricos y el SPS son las aplicaciones de TIP por haces de ondas radioeléctricas que se están estudiando. Se están estudiando y desarrollando tecnologías de TIP que utilizan haces anchos para múltiples usuarios en distancias cortas, tecnologías TIP en áreas cerradas y tecnologías TIP que utilizan haces estrechos en distancias cortas/largas.

Las tecnologías TIP que utilizan haces anchos para múltiples usuarios en distancias cortas se han estudiado utilizando las bandas de 2,45 GHz, 5,8 GHz y 900 MHz bandas y servirán para las redes de sensores con alimentación inalámbrica y cargadores inalámbricos de dispositivos móviles.

Las tecnologías TIP en áreas cerradas se han estudiado utilizando las bandas de 2,45 GHz y 5,8 GHz y servirán para las hojas TIP, la TPM por tubos y los edificios de microondas.

Las tecnologías TIP que utilizan haces estrechos para un usuario en distancias cortas/largas se han estudiado en las bandas de 2,45 GHz y 5,8 GHz y se utilizarán para la TIP para objetos en movimiento/volantes, la TIP punto a punto, la carga inalámbrica y de vehículos eléctricos y el satélite de energía solar.

De acuerdo con este Informe es necesario seguir estudiando las repercusiones de estos sistemas TIP para otros sistemas existentes, además de los aspectos de seguridad, como la exposición de las personas a los campos electromagnéticos, a fin de que estas aplicaciones lleguen a ser una realidad.