

Proyecto Fin de Carrera  
“**Caracterización del canal radio en plataformas espaciales**”

Proyecto realizado por Oscar Fernández Fernández, dirigido por Dña. Marta Domingo Gracia profesor del Dpto. Ingeniería de Comunicación de la Universidad de Cantabria. Presentado el 19 de Julio de 2001 obteniendo una calificación de Matrícula de Honor - 10

**Otros datos de interés:**

**Publicaciones:**

Título: Feasibility study for wireless data transmission inside space platforms

Congreso: European Microwave Week. Wireless Technologies

Publicación: Proceedings of ECWT 2000 (ISBN:0-8621132217-7)

Lugar de celebración: Paris. Francia

Fecha: 2000

---

Título: Feasibility study for wireless data transmission inside space platforms

Congreso: IEEE Vehicular Technology Conference

Publicación: Proceedings of IEEE VTS 53<sup>rd</sup> Vehicular Technology Conference, May 6-9, 2001

Lugar de celebración: Rhodas. Grecia

Fecha: 2001

---

Título: Analysis of the performance of a wireless system inside space platforms

Enviado para su publicación a IEEE Transactions on wireless Communications

---

Título: Análisis del comportamiento de sistemas inalámbricos en el interior de plataformas espaciales

Preparado para ser enviado para su aceptación al Symposium Nacional de la URSI 2002 que se celebrará en la Universidad de Alcalá.

**Proyectos relacionados con este PFC:**

Título del proyecto: Desarrollo y prototipo de un sistema de transmisión de datos sin cables para optimización de vehículos espaciales.

Entidad financiadora: CICYT, ESP99-0553.

Duración, desde: 1999                      hasta: 2001

---

Título del proyecto: Modelos específicos de canal radio y su aplicación a la simulación y diseño de sistemas avanzados de diversidad en aplicaciones WLAN y WPAN.

Entidad financiadora: TIC2001-0596.

Duración, desde: 2002                      hasta: 2004

---

# Caracterización del canal radio en plataformas espaciales

## 1. Introducción:

Desde que en 1897 Marchese Gugliermo Marconi realizase la primera transmisión vía radio, la tecnología inalámbrica ha ido creciendo y madurando, y empleándose paulatinamente en servicios de telecomunicación tradicionalmente reservados para el cable.

La tecnología radio proporciona unas ventajas frente al cable que motivan su rápida inmersión en los mercados de telecomunicaciones, tanto en las redes WAN como posteriormente en las LAN.

Las redes WAN (Wide Area Networks) fueron las primeras en implementar sistemas radio para las telecomunicaciones, si bien el “backbone” de estas redes en general sigue siendo cableado (fibra óptica). Estas redes de área extensa como las de telefonía móvil celular (AMPS,GSM,UMTS) u otras como LMDS y MMDS usan la tecnología radio para la comunicación entre enlaces punto a punto y en el bucle de abonado ya sea mediante punto a punto o punto - multipunto. Es en este último punto donde aparecen los mayores inconvenientes de la utilización del canal radio como medio de transmisión. Estos inconvenientes se producen por varios factores:

- Atenuación de la señal debido a la propagación y los obstáculos.
- Desvanecimientos a corto y largo plazo debidos a la señal multicamino, producida por las múltiples reflexiones y difracciones producidas en obstáculos.
- Dispersión en frecuencia de la señal debido al movimiento de los obstáculos y las estaciones móviles.

Estos factores requieren un estudio exhaustivo de la propagación de la señal (estudios realizados por autores como Okumura, Hata, Lee, Ikegami, etc).

En la última década las redes de área local (Ethernet, Token Ring, etc.) también han evolucionado sufriendo una transformación radical en su núcleo, el medio de transmisión. El cable, en sus diversos tipos, (coaxial, par de cobre) ha sido tradicionalmente el medio compartido para el transporte de la información entre puntos de la red. Sin embargo este medio de transmisión presenta limitaciones e inconvenientes. La mayor limitación es la restricción de la movilidad, lo que lleva a redes con usuarios estáticos. Tampoco se deben olvidar otras limitaciones como la poca flexibilidad para el crecimiento y evolución de la red, dificultad para el tendido del cableado y su posterior reutilización, reparación de fallos más costosa, etc...

Las redes de área local se suelen desarrollar en entornos interiores donde la dispersión y la reflexión se convierten en mecanismos condicionantes y restrictivos de la propagación de la señal radio, más aún que en las redes WAN. Por estos motivos el estudio y caracterización del canal radio en estos entornos se convierte en un paso necesario al desarrollar un sistema “Wireless”.

Pese a los inconvenientes que presentan las redes inalámbricas en cuanto a al canal de transmisión, sus ventajas, movilidad y flexibilidad, los compensan sobradamente, siendo cada vez más demandadas por el mercado.

Estas ventajas pueden ser muy rentables en otros entornos como vehículos y módulos espaciales. El problema que se presenta es que estos módulos tienen unas dimensiones muy reducidas, y requieren una calidad óptima en las comunicaciones, por lo que es posible que los sistemas actuales de redes WLAN no sean válidos para estos entornos con un canal radio tan singular.

El objetivo de este proyecto es evaluar el canal radio en el interior de estos módulos y conocer con detalle sus características de radio propagación para así estar en disposición de implementar cualquier sistema de comunicaciones inalámbrico que sustituya en la medida de lo posible a las ya existentes, no solo para obtener mayor movilidad y flexibilidad, sino por otros motivos que son, aun si cabe, más importantes: el espacio y el peso. La sustitución de redes de cable por sistemas inalámbricos permite reducir peso y reaprovechamiento del espacio físico reservado para este cableado.

## **2. Módulos espaciales:**

El desarrollo de la carrera espacial ha venido acompañado del desarrollo de distintos satélites, vehículos y estaciones espaciales que han permitido la investigación en diferentes áreas tanto de la tierra como de la propia vida humana, con unas condiciones que no se pueden repetir en la tierra.

Estos módulos están dotados del más avanzado equipamiento e instrumentación tanto para las labores investigadoras como para los sistemas propios de navegación y control.

El proyecto internacional más ambicioso en materia espacial es la construcción de la Estación Espacial Internacional (ISS). Por este motivo se tomó como ejemplo de módulo arquetipo los laboratorios que componen la ISS, en particular el laboratorio "Columbus" desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA).

Este laboratorio es un cilindro de 4.5 metros de diámetro cerrado por extremos cónicos, formando de esta manera un volumen habitable presurizado de 8 metros de largo. El volumen total es aproximadamente 75 m<sup>3</sup>, aunque se reducen a 50 m<sup>3</sup> al introducir la carga útil. Esta carga útil está distribuida en compartimentos o racks independientes denominados "ISPR". Estos ISPR disponen de sus propias conexiones de alimentación eléctrica, ventilación así como conexiones de datos.

Las conexiones de datos son de tres tipos:

- Buses de datos de control que siguen el protocolo MIL-STD-1553B, basados en pares de cables trenzados apantallados con unas velocidades de transmisión de datos bajas (menor de 1Mbps).
- Enlaces de datos por fibra óptica de alta velocidad binaria (high-rate data link (HRDL)) que en el Columbus llegan a velocidades 32 Mbps.
- Redes de área local (LANs) Ethernet basadas en el estándar IEEE 802.3 que permite comunicaciones de hasta 10Mbps.

Este cableado, los pares de cables trenzados apantallados del protocolo MIL-STD-1553B y los buses de la red de área local, representa un gran inconveniente respecto a peso y volumen. Eliminandolo y sustituyéndolo por sistemas inalámbricos se aumentaría el espacio habitable en un 10% y disminuiría el peso unos 70 Kg. por módulo.

Para poder llevar a cabo la caracterización del canal se utilizan dos metodologías, simulaciones y medidas de campo. Para realizar las medidas del canal radio en el interior del laboratorio se construyó una maqueta de un módulo espacial. Esta maqueta se realizó con superficies de aluminio, con el doble propósito de obtener una Jaula de Faraday que apantalle las señales radio exteriores y que por otro lado simule el interior de un módulo con superficies muy conductoras.

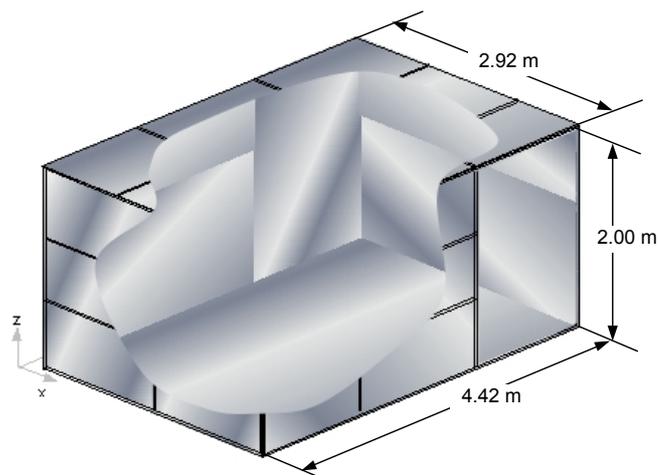


Figura 1: Representación del módulo construido.

También se tuvo en cuenta la posibilidad de diversas superficies de distintas propiedades eléctricas y con diferente rugosidad. Para modelar este conjunto se acondicionó el módulo con equipamiento diverso, en particular material informático e instrumentación electrónica.



Figura 2: Interior del modulo acondicionado.

### **3. Caracterización del canal:**

El entorno en el que se produce la comunicación vía radio afecta de manera fundamental a las características de la propia comunicación, convirtiéndose en un elemento clave en sistemas vía radio.

El canal radio como tal se comporta como un filtro selectivo en frecuencia. Es importante conocer su comportamiento ante portadoras y ante señales con mayor ancho de banda.

Para realizar esta caracterización del canal a través de las simulaciones se ha programado de manera específica para este proyecto una herramienta software denominada ICARO que implementa los métodos de alta frecuencia, Óptica Física (PO) y Óptica Geométrica (GO), para el modelado de la señal electromagnética en el interior de la cámara. Las reflexiones de primer y segundo orden se modelan mediante óptica física para así tener en cuenta las componentes de campo difuso de esta óptica a diferencia de la óptica geométrica que solo tiene en cuenta las componentes especulares. Dependiendo de la importancia de estas componentes de campo difuso, la PO proporciona mayores mejoras sobre GO. Para las componentes de campo reflejado de tercer y cuarto orden se utiliza GO dado que el campo difuso tiende a ser despreciable después de repetidas reflexiones.

Al comparar los resultados obtenidos mediante el simulador ICARO con otros resultados procedentes de medidas en entornos reales (túneles) se valida la herramienta, llegando a la conclusión de que el simulador proporciona unos resultados muy buenos. Además, si se compara con los resultados que ofrecen otras herramientas software de simulación en interiores basadas en el trazado de rayos, se observa que el simulador ICARO, gracias a la óptica física, proporciona mejores resultados.

#### **3.1. Caracterización en banda estrecha:**

La caracterización en banda estrecha se realiza para analizar la propagación de la señal radioeléctrica en el medio. Para ello se transmite una portadora y se estudia los niveles de potencia en cada punto del recinto, prestando especial atención a las zonas en que esta señal sufre desvanecimientos importantes. A partir de estos desvanecimientos resulta interesante realizar una estadística de los mismos que proporcione una valoración de la fluctuación que sufre el nivel medio de señal y en particular permite determinar de forma general la probabilidad de que la señal sufra desvanecimientos profundos.

La caracterización en banda estrecha se realiza a través de medidas en el interior de la maqueta del módulo espacial y simulaciones mediante el software ICARO. Esta caracterización se realiza para los dos entornos propuestos:

1. En la primera fase, se pretende caracterizar el módulo de superficies conductoras o de un entorno rodeado por gran cantidad de elementos metálicos conductores, como puede ser un taller industrial en el cual su estructura y la maquinaria contenida en él componen un entorno eléctricamente conductor.

- En la segunda fase, el interior del compartimento adopta una imagen similar al interior de los habitáculos espaciales. De este modo, se caracteriza en banda estrecha el canal radio en el interior de un habitáculo espacial con unas superficies más dieléctricas.

La realización de las medidas en banda estrecha se llevo a cabo mediante un sistema automático de medida sobre trayectorias lineales de 2 metros de longitud. Como transmisor y receptor se utilizó el analizador vectorial de señal HP89441A que consta del analizador vectorial de señal en banda base HP 89410A (dc a 10Mhz) y de una sección de RF HP89431A que permite trabajar con frecuencias de hasta 2.65 GHz. Este analizador vectorial de señal dispone de una fuente interna con un rango de potencias entre  $-40$  y  $13$  dBm.

Las medidas en banda estrecha se realizaron a la frecuencia de 2.5 GHz.

Para transmisión y recepción se utilizaron antenas (Electro Metrics 6865) omni-direccionales de banda ancha verticalmente polarizadas y con frecuencias de trabajo entre 2 y 18 GHz. Se situaron la antena transmisora a 1.67m de altura y a 1.45m. la receptora.

La posición de la antena transmisora se mantuvo fija para cada conjunto de medidas, mientras que para realizar el posicionamiento de la antena receptora a lo largo de la trayectoria recta, se utilizó una unidad lineal controlada mediante un PC

El analizador vectorial se configuró para capturar la señal recibida en el dominio del tiempo, capturando muestras cada 0.015 mm, que se transfieren vía bus HP-IB a un ordenador. Se realizo un diezmado de los resultados para seleccionar las muestras cada  $\lambda/8$ .

### Estudio del módulo con paredes conductoras- Cámara vacía:

Las comparaciones entre medidas y simulaciones proporcionan resultados como los de la gráfica siguiente. Las simulaciones se han realizado considerando hasta la reflexión de cuarto orden.

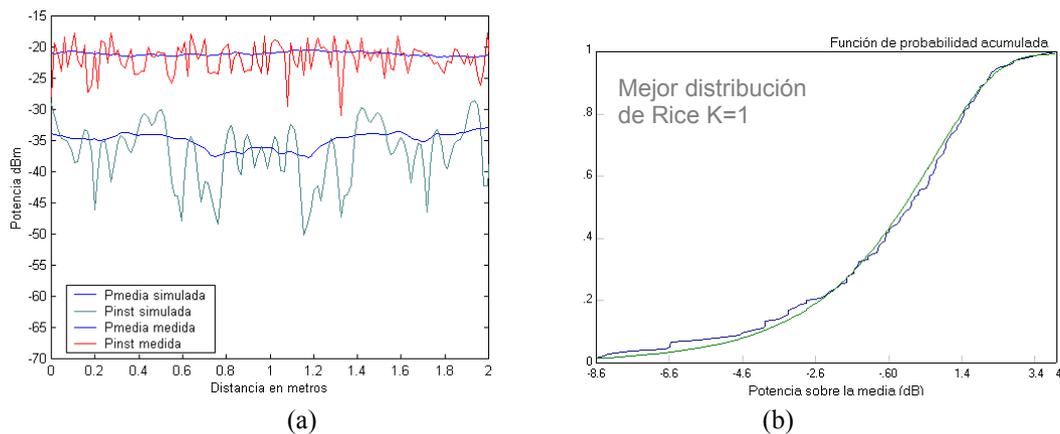


Figura 3: Niveles de Potencia (a) y Estadística de los desvanecimientos (b)

La alta conductividad de las superficies del entorno influye notablemente en las reflexiones. El comportamiento del campo reflejado medido es diferente del supuesto a priori donde se esperaba que las contribuciones de las múltiples reflexiones de orden mayor de cuatro no contribuyesen significativamente al campo total.

En entornos de este tipo se debe tener en cuenta las aportaciones que ofrecen las múltiples reflexiones de ordenes altos. En este caso la alta conductividad hace que las paredes actúen como “espejos” para las ondas electromagnéticas. Este hecho unido a las reducidas dimensiones del recinto produce un efecto comparable al de una cavidad resonante.

La potencia media medida en el módulo se mantiene a niveles constantes, al igual que la obtenida a través del simulador, aunque con menores niveles. Se puede afirmar por tanto que los niveles de potencia en toda la cámara no sufren atenuaciones importantes lo que garantiza cobertura en toda la cámara.

La estadística de los desvanecimientos que sufre la señal radio en el interior del módulo sigue una distribución de Rayleigh lo que da una idea de lo predominante que son las reflexiones en este entorno con respecto a la componente de campo directo.

### Estudio del módulo con paredes dieléctricas- Cámara acondicionada:

En este caso las medidas y simulaciones proporcionan unos resultados más similares:

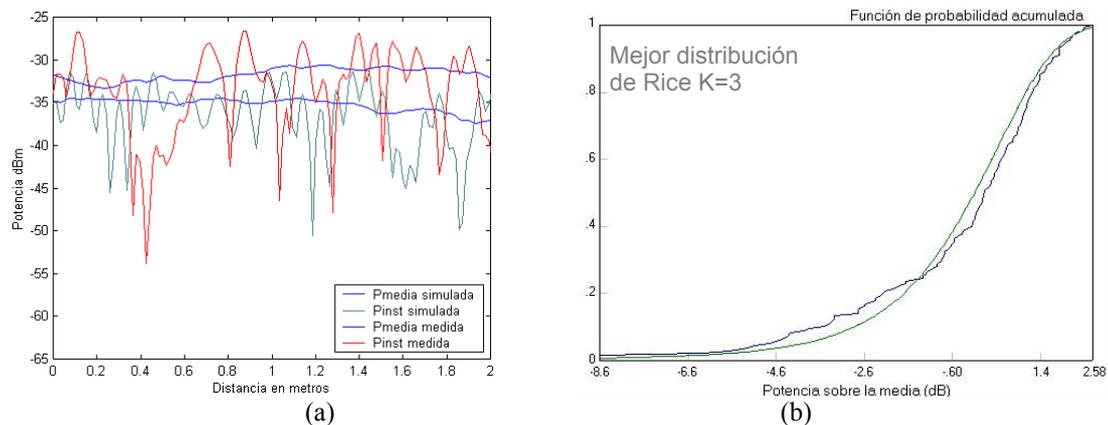


Figura 4: Niveles de Potencia (a) y Estadística de los desvanecimientos (b)

Las reflexiones de ordenes altos disminuyen notablemente dado que las superficies son más dieléctricas. Al atenuarse más las reflexiones se suman menos componentes de campo reflejado al campo total por lo que los desvanecimientos que sufre la señal son mas acentuados.

Los resultados obtenidos se acercan más a los esperados a priori, aproximándose enormemente medidas y simulaciones.

La estadística de los desvanecimientos que sufre la señal radio denotan distribuciones de Rice con valores de K entorno a 5 lo que demuestra como la señal de campo directo adquiere protagonismo frente a las reflexiones.

### Conclusiones de la Caracterización del Canal Radio en Banda Estrecha

La idea principal que se extrae de este análisis en banda estrecha es que el entorno conductor presenta unas características mas complejas de las que se esperaban a priori y que limitarán las comunicaciones. De hecho, aunque se obtenga unos niveles importantes de señal

en el interior del módulo, estos son debidos a las contribuciones aportadas por las múltiples reflexiones, incluso de ordenes altos, que sin duda supondrán un obstáculo.

El escenario con elementos más dieléctricos presenta unas condiciones de canal radio en banda estrecha más óptimas, teniendo en cuenta que se trata de entornos interiores y de dimensiones muy reducidas, lo que conlleva muchos inconvenientes en cuanto a reflexión.

### 3.2. Caracterización en Banda ancha

Para poder implementar un sistema de comunicaciones digitales vía radio de alta velocidad es necesario determinar las características y limitaciones que impone este canal radio para señales de banda ancha. La caracterización en banda ancha tiene como objetivo determinar la respuesta al impulso del canal y a partir de esta otros parámetros importantes que definen el comportamiento del canal, como puede ser el ancho de banda de coherencia y parámetros como el retardo medio y la dispersión media del retardo.

Para la caracterización del canal en banda ancha se utilizo un sistema de medida de barrido en frecuencia basado en el analizador de redes HP8510C

La potencia de transmisión se fijo en 10 dBm, y se trabajo a dos frecuencias, 2.5 GHz y 17 GHz. Se transmitió un pulso con un ancho de banda de 500 MHz en torno cada una de las portadoras. Mediante el analizador de redes se mide el parámetro  $S_{21}$  el cual es proporcional a la función de transferencia del canal:  $S_{21\text{resultante}} \propto H_w(f)$

Del parámetro  $H_w(f)$  se obtiene la respuesta al impulso del canal  $h_w(t)$  aplicando la transformada inversa discreta de Fourier IDTF. Al conocer esta respuesta al impulso se puede obtener otros parámetros importantes como el perfil potencia retardo  $P(\tau)=|h_w(\tau=t-t_0)|^2$ , siendo  $\tau$  el retardo de las componentes respecto a la primera que llega al receptor, la cual alcanza al receptor en  $t=t_0$ .

Una vez se obtiene el perfil potencia retardo, la función de autocorrelación  $R(w)$  se obtiene aplicando la transformada de Fourier

A partir de la función de autocorrelación se obtiene el ancho de banda de coherencia, es decir, el rango de frecuencias en los que  $R(w)$  normalizado es mayor o igual que un cierto valor (como factores típicos se suele tomar 0.5 ó 0.9)

El calculo de los parámetros del canal anteriormente mencionados, el retardo medio y la dispersión de retardo rms, se realiza a partir del perfil potencia retardo  $P(\tau)=|h_w(\tau)|^2$ :

El retardo medio y el retardo cuadrático medio se calculan de la siguiente manera:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\infty} P(\tau) \cdot \tau \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} P(\tau) \cdot d\tau}$$

$$\sigma = \sqrt{\tau^2 - \bar{\tau}^2} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} P(\tau) \cdot \tau^2 \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} P(\tau) \cdot d\tau} - \bar{\tau}^2}$$

La posición de la antena transmisora es fija para toda la campaña de medidas, mientras que la antena receptora se posicionó de forma manual en cada uno de los cinco puntos de las áreas locales medidas.

Las antenas utilizadas son las mismas antenas que las usadas en las medidas de banda estrecha. La antena transmisora se situó a 1.45 metros del suelo, mientras que la receptora se situó a 1.67 metros.

Al igual que con la caracterización en banda estrecha se analizaron ambos escenarios en banda ancha en este caso para dos frecuencias.

### Estudio del módulo de superficies conductoras – cámara vacía

En la cámara vacía la influencia de las reflexiones comentadas en banda estrecha es determinante. Las funciones de transferencia medidas en este entorno a ambas frecuencias lo demuestran:

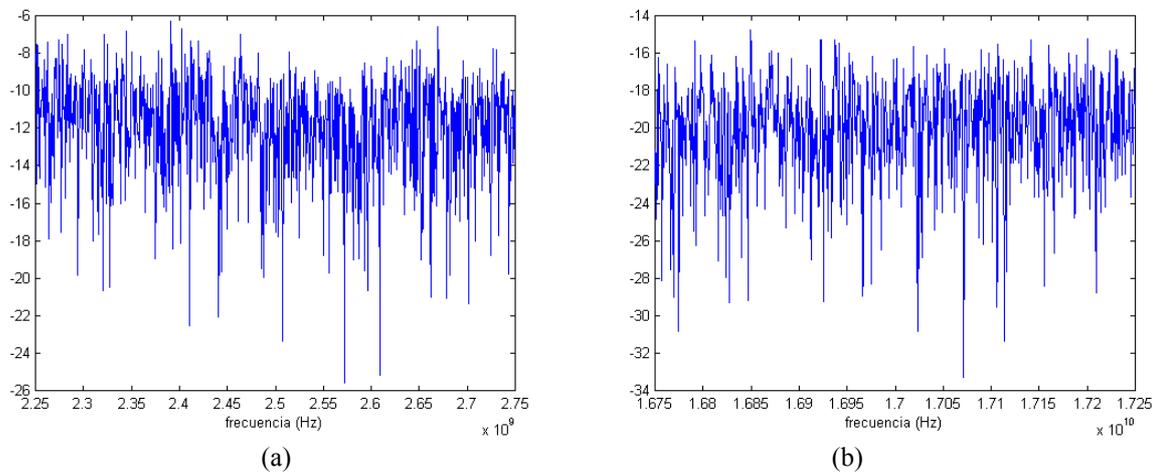


Figura 5: Función de transferencia del canal (dB) en cámara vacía a 2.5 (a) y 17 GHz (b)

Para ambas frecuencias las funciones de transferencia muestran una respuesta muy variable en frecuencia. Los perfiles retardo potencia que se obtienen a partir de estas funciones de transferencia (figura 6) demuestran como las componentes de campo reflejado que alcanzan al receptor sufre poca atenuación, especialmente a 2.5GHz, lo cual unido a los grandes retardos que registran puede producir importantes problemas de interferencia entre símbolos (ISI).

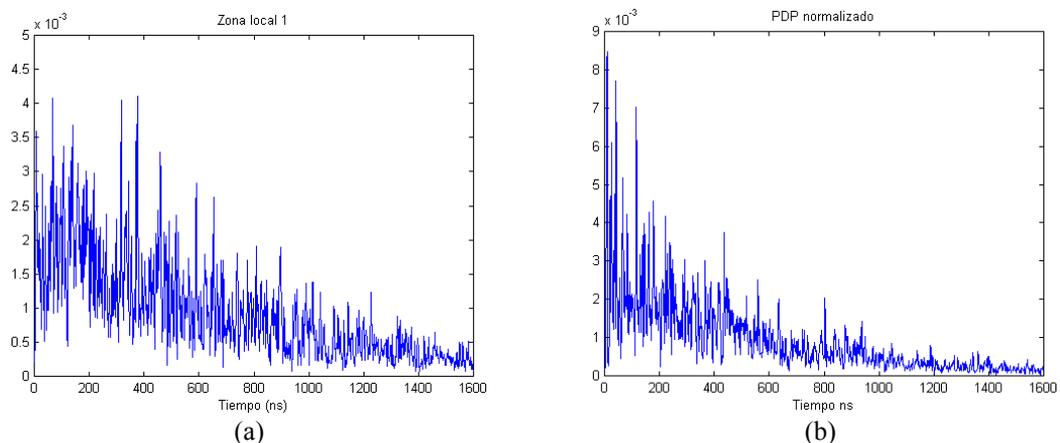


Figura 6: PDP normalizado (dB) medido en la cámara vacía a 2.5 GHz (a) y 17 GHz (b)

El ensanchamiento temporal del perfil retardo potencia produce, tal como demuestran las funciones de autocorrelación, que el canal sea muy selectivo en frecuencia.

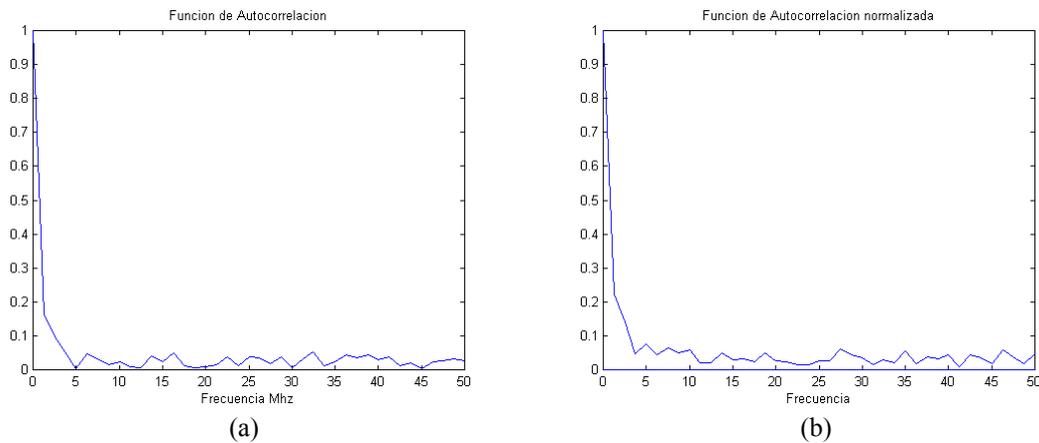


Figura 7: Función de autocorrelación normalizada de las medidas, 2.5 GHz (a) y 17 GHz (b)

La separación entre componentes con un grado de correlación mayor o igual a 0.5 no alcanza 1MHz, es decir, establece unos anchos de banda de coherencia muy pequeños.

La gráfica siguiente muestra cuantitativamente los valores más importantes del canal:

	Retraso medio $\bar{\tau}$ (ns)	Retardo cuadrático medio $\tau_{rms}$ (ns)	Ancho de banda de coherencia 50% MHz	Ancho de banda de coherencia 90% MHz
2.5 GHz	$338.5339 \pm 13.0$	$221.09 \pm 8.6$	$0.7595 \pm 0.04$	$0.1519 \pm 0.01$
17 GHz	$303.3900 \pm 19.6$	$213.56 \pm 4.3$	$0.8115 \pm 0.06$	$0.1623 \pm 0.01$

Tabla 1: Parámetros del canal radio medidos

Presenta un retardo medio de 300 ns y un retardo cuadrático medio de más de 200 ns lo cual significa que el canal es muy dispersivo. Además el ancho de banda de coherencia que presenta es menor de 1 MHz, lo que obligará a utilizar en la transmisión anchos de banda pequeños.

Las simulaciones realizadas de este escenario en banda ancha no llegan a aproximarse a los obtenidos en las medidas, debido a que la herramienta software que se programó para este proyecto (ICARO) es un simulador de carácter general que implementa únicamente hasta la reflexión de orden cuarto (cuádruple reflexión). En este entorno tan complejo los ordenes que alcanzan las múltiples reflexiones son mucho mayores.

Es fundamental destacar de este punto la enorme importancia que puede suscitar la caracterización del canal radio en entornos tan conductores, debido a que las herramientas software, que solo implementan un número reducido de ordenes de reflexión pueden proporcionar valores demasiado optimistas que pueden conducir al error a la hora de planificar e implementar el sistema de comunicaciones.

## Estudio módulo de superficies dieléctricas – Cámara Acondicionada

El módulo acondicionado presenta unas condiciones más propicias para la comunicación. Las funciones de transferencia a ambas frecuencias así lo demuestran:

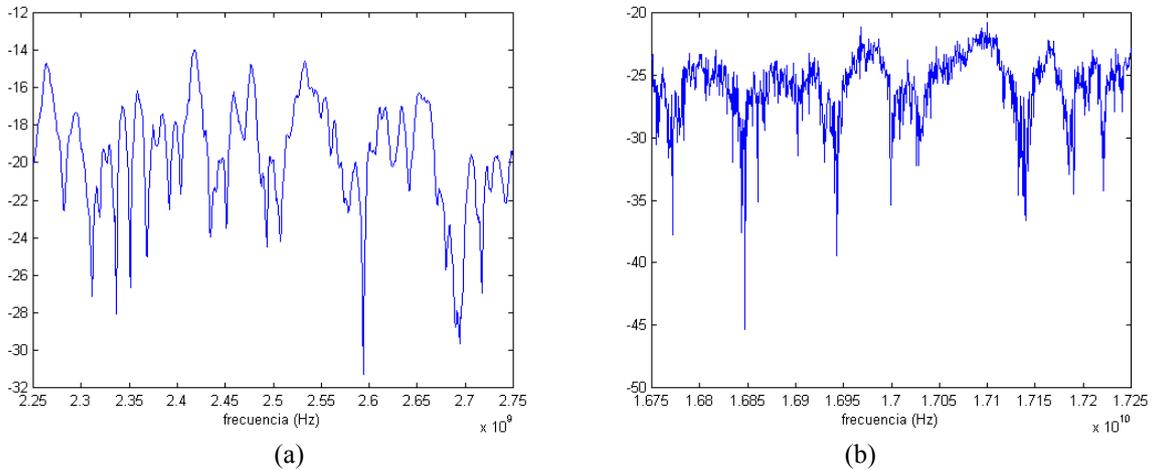


Figura 8: Función de transferencia del canal (dB) en cámara acondicionada a 2.5 (a) y 17 GHz (b)

Es destacable observar como las funciones de transferencias son mucho menos variables con la frecuencia.

Los perfiles retardo potencia muestran un ensanchamiento menor de la respuesta del canal, así como una mayor atenuación de las componentes en función del retardo.

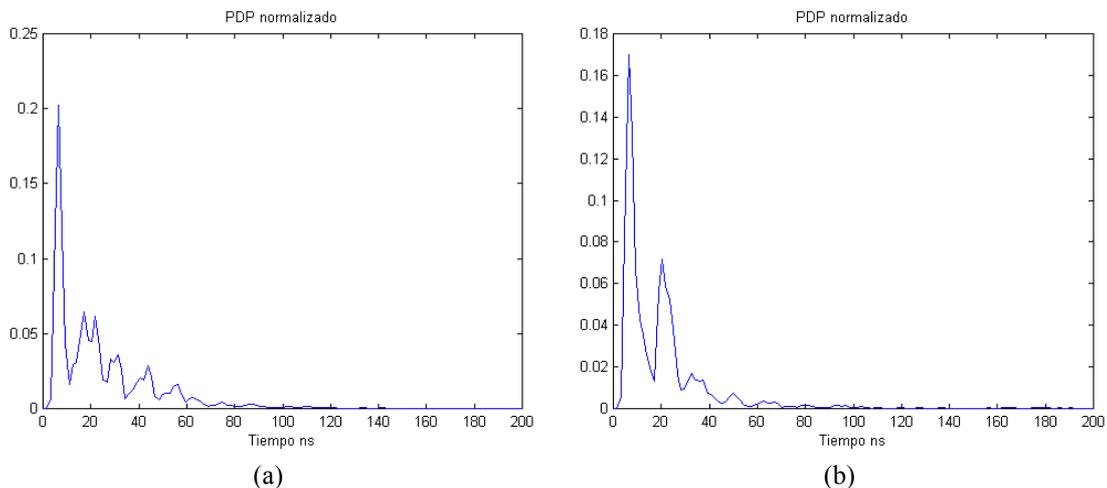


Figura 9: Perfil potencia retardo normalizado medido a 2.5 GHz (a) y 17 GHz (b)

Las simulaciones en este caso proporcionan unos resultados más próximos a los datos medidos. Los perfiles retardo potencia obtenidos a través de simulaciones, aunque son temporalmente más breves muestran las mismas tendencias:

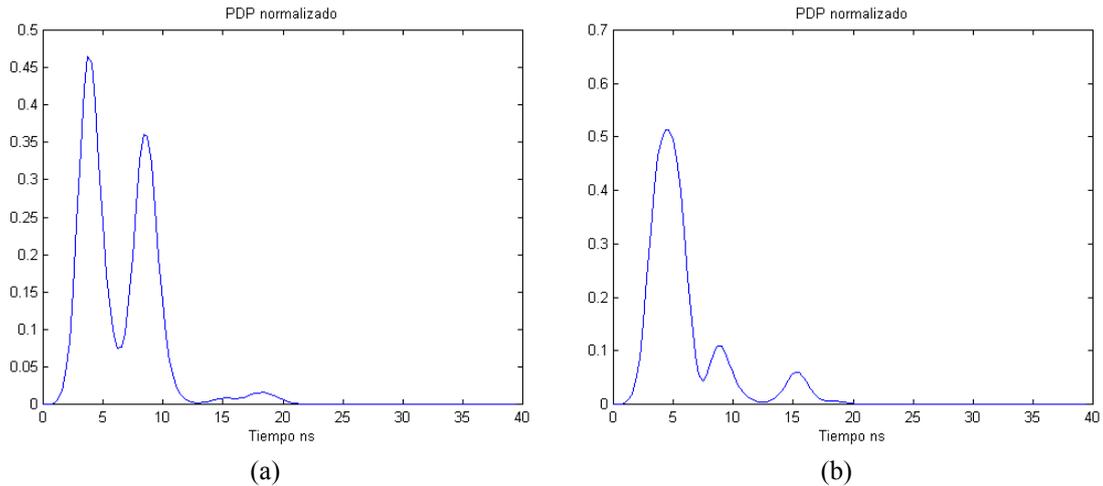


Figura 10: Perfil potencia retardo normalizado simulado a 2.5 GHz (a) y 17 GHz (b)

Las funciones de correlación muestran como la disminución del ensanchamiento temporal de la respuesta del canal propicia mayores anchos de banda de coherencia:

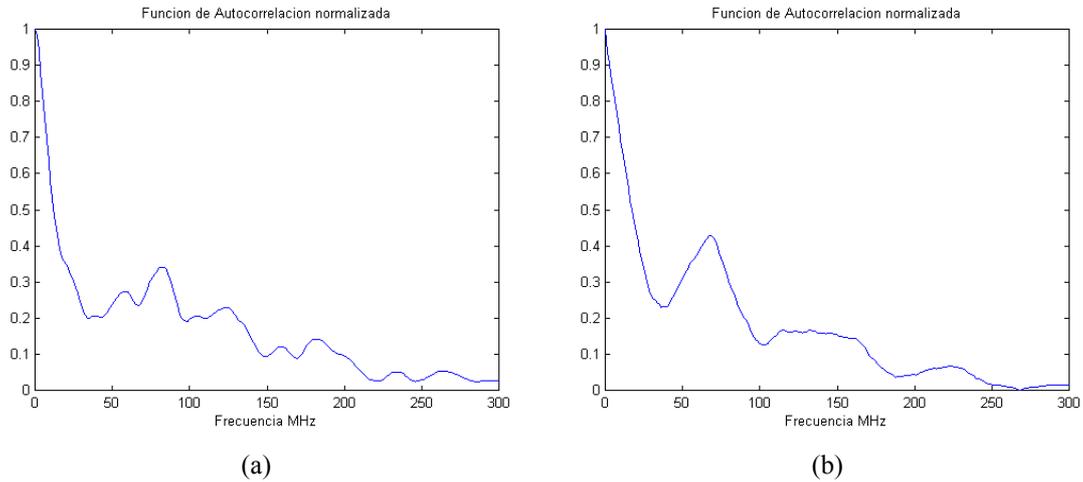


Figura 11: Función de autocorrelación de las medidas, 2.5 GHz (a) y 17 GHz (b)

De manera cuantitativa se muestran los valores del canal obtenidos tanto mediante medidas como simulaciones para ambas frecuencias.

	Retraso medio $\bar{\tau}$ (ns)	Retardo cuadrático medio $\tau_{\text{rms}}$ (ns)	Ancho de banda de coherencia 50% Mhz	Ancho de banda de coherencia 90% Mhz
<b>Medidas</b>	$22.1264 \pm 3.196$	$22.8592 \pm 0.840$	$12.7429 \pm 2.397$	$3.4122 \pm 0.167$
<b>Simulaciones</b>	$6.4112 \pm 0.925$	$3.0747 \pm 0.627$	$80.3408 \pm 10.968$	$24.3043 \pm 5.747$

Tabla 2: Parámetros del canal radio para la frecuencia de 2.5 GHz

	Retraso medio $\bar{\tau}$ (ns)	Retardo cuadrático medio $\tau_{\text{rms}}$ (ns)	Ancho de banda de coherencia 50% MHz	Ancho de banda de coherencia 90% MHz
<b>Medidas</b>	$18.0263 \pm 7.995$	$25.3463 \pm 17.026$	$23.4734 \pm 15.293$	$2.94776 \pm 1.742$
<b>Simulaciones</b>	$5.8916 \pm 1.101$	$3.1428 \pm 0.698$	$127.9224 \pm 43.783$	$24.8212 \pm 8.708$

Tabla 3: Parámetros del canal radio para la frecuencia de 17 GHz

## **Conclusiones de la caracterización del Canal Radio en Banda Ancha**

En la caracterización en banda ancha se observa la complejidad que ofrece el primer escenario, un entorno muy dispersivo con unos retardos cuadráticos medios en torno a 200 ns y un ancho de banda de coherencia  $B_{50}$  menores de 1 MHz, que impone serias limitaciones a comunicaciones de banda ancha en ese medio.

El escenario con superficies dieléctricas proporciona mejores resultados, con unos retardos cuadráticos medios mucho menores y mayor ancho de banda lo que permite la transmisión de señales digitales con mayor velocidad binaria sin la aparición de ISI.

### **4. Conclusiones del proyecto:**

A lo largo de este proyecto se ha caracterizado el canal radio tanto en banda estrecha como en banda ancha en el interior de una cámara que simula un entorno espacial suponiendo dos escenarios posibles, diferenciados fundamentalmente por las características eléctricas de las superficies que lo conforman

El primer entorno, la cámara vacía, se caracteriza por estar formado por superficies muy conductoras. El canal en este entorno está determinado por la influencia que ejercen estos conductores sobre cada componente de campo reflejada en dicho conductor. La alta conductividad de las superficies hace que los coeficientes de reflexión de Fresnell sean de módulo prácticamente igual a uno, por lo que actúan como un espejo para la señal electromagnética. Al sufrir la reflexión tan poca atenuación unido con las reducidas dimensiones de habitáculo, se producen múltiples reflexiones de ordenes elevados las cuales condicionan el canal radio. En banda estrecha la suma de componentes eleva los niveles medios de la señal recibida muy por encima de los obtenidos en espacio libre. En banda ancha los retardos introducidos por las múltiples reflexiones hacen un canal muy dispersivo con un retardo cuadrático medio mayor de 200ns por lo que el ancho de banda de coherencia es muy pequeño, menor de 1 MHz, será muy selectivo en frecuencia, lo que obliga a transmitir señales de poco ancho de banda - baja velocidad binaria.

Las simulaciones por su parte muestran tendencias similares pero con unos niveles medios mucho más bajos que las medidas, debido a que el simulador no implementa reflexiones de ordenes superiores a cuatro.

En la cámara ya acondicionada las múltiples reflexiones se atenúan rápidamente gracias a las superficies dieléctricas. En banda estrecha los niveles medios disminuyen dado que no se suman tantas componentes de magnitud considerable de campo reflejado. Este efecto hace que los resultados obtenidos por el simulador sean mucho más similares a los medidos, dado que en este caso las componentes que más influyen además del campo directo son las reflexiones de primeros ordenes.

En banda ancha, la atenuación de estas reflexiones favorece que solo alcancen al receptor los “ecos” del pulso transmitido menos retardados. Esto se traduce en menores retardos medios (entorno a 20 ns) y menor retardo cuadrático medio (también entorno a 20 ns) lo que hace que el canal sea mucho menos dispersivo y permita transmitir mayores velocidades binarias sin que se produzca ISI. Además el ancho de banda de coherencia es mayor que en la cámara vacía, con un valor medido mínimo de 12 MHz a 2.5 GHz y de 13 MHz a 17 GHz, por lo que permite transmitir señales con anchos de banda mayores que en el

escenario anterior. Las respuestas obtenidas para ambas frecuencias demuestra un comportamiento del entorno poco variable con la frecuencia, por lo que la utilización de frecuencias superiores no solo sería viable sino que incluso sería recomendable para evitar las posibles interferencias con el resto de instrumental del módulo.

En un módulo espacial los materiales que componen las superficies en general no son muy conductores por lo que el segundo escenario se aproxima más a las características de estos módulos. Se podrán implementar sistemas de comunicaciones inalámbricos tanto estandarizados como propietarios que cumplan ciertos requisitos. El ancho de banda utilizable por estos sistemas varía entre 12 y 13 MHz dependiendo de la frecuencia de utilización.

Aunque el primer objetivo de este proyecto era la caracterización de plataformas espaciales, se han establecido otras conclusiones de carácter más amplio, aplicables a otros entornos y de gran importancia para la implantación de redes inalámbricas en interiores. Se ha mostrado como el entorno de características conductoras condiciona notablemente la respuesta global del canal radio. La instalación de redes inalámbricas comerciales en entornos industriales como talleres mecánicos, cadenas de producción o naves industriales con gran cantidad de maquinaria y en general con gran cantidad de elementos conductores puede llevar a un funcionamiento anómalo, en el que los sistemas funcionen por debajo de su capacidad óptima, o incluso no consigan unos niveles mínimos aceptables. Si se comparan con los resultados obtenidos en entornos interiores típicos, se observa como el retardo cuadrático medio oscila entre los 20 – 30 ns mientras que en un entorno tan conductor alcanza los 200 ns lo que limita enormemente el ancho de banda utilizable – velocidad binaria si aparición de ISI (También sin tener en cuenta técnicas de ecualización). Es por esto que los valores típicos de ancho de banda de coherencia típicos de 6-10 MHz de los entornos normales de interiores contrastan con el ancho de banda de coherencia inferior a 1 MHz del entorno conductor.