

# LABORATORIO DE ALTA FRECUENCIA: PRÁCTICAS CON CIRCUITOS PASIVOS DE MICROONDAS

P. LARA BULLEJOS, J. A. JIMÉNEZ TEJADA

*Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. Campus de Fuentenueva. 18071 Granada*

*En esta comunicación se presentan un conjunto de circuitos usados como prácticas de laboratorio para el aprendizaje de las técnicas empleadas en el diseño, implementación y caracterización de sistemas con frecuencia de funcionamiento comprendida en el rango de las microondas. Los circuitos usados constituyen elementos básicos para la construcción de mezcladores, receptores o procesadores de señal, y se han usado en las prácticas de asignaturas de grado como herramienta de aprendizaje significativo.*

## 1. Introducción

El nacimiento de la telefonía móvil, la televisión digital terrestre, los sistemas de navegación para automóviles, junto a las aplicaciones ya existentes hacen cada vez más necesario el aprovechamiento eficiente del espectro radioeléctrico. Como respuesta a este reto se hace necesario el aumento de la frecuencia de funcionamiento de los sistemas de comunicación obteniendo para antenas de similares dimensiones mayores ganancias y ancho de banda. Este hecho sumado a la linealidad con la que las microondas atraviesan la ionosfera para conectar con los satélites y su utilidad en sistemas de radar para control de tráfico aéreo, hacen de las microondas uno de los campos más importantes de la electrónica [1]. Esto debe tener su repercusión a nivel docente e implica que en las titulaciones relacionadas con la electrónica se debe prestar especial interés a los circuitos de alta frecuencia, bien con asignaturas específicas optativas, bien como bloques relevantes de asignaturas troncales.

El inconveniente que presentan estos temas dentro de una titulación relacionada con la electrónica es el pequeño número de créditos que tienen asignados en comparación con otras disciplinas. En concreto, en la titulación de segundo ciclo de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Granada, donde se elaboró este trabajo, al diseño de circuitos integrados de microondas le corresponden seis créditos dentro de la carga optativa de esta titulación. No sólo es pequeño el número de créditos asignados sino que los alumnos no han cursado en asignaturas obligatorias las bases teóricas necesarias para abordar con éxito el diseño completo de un circuito pasivo o activo de microondas.

## 2. Objetivos y metodología

Los objetivos que se persiguen por tanto son: que el estudiante asimile de forma eficiente y en un corto espacio de tiempo conceptos teóricos básicos como las ondas guiadas en líneas de transmisión; que comprenda y maneje herramientas de análisis de circuitos de alta frecuencia; que analice y diseñe circuitos pasivos y activos de microondas; y finalmente que monte y compruebe experimentalmente estos diseños. Incluso para lograr este último objetivo el estudiante se enfrenta a nuevos retos, puesto que la tecnología de fabricación de un circuito de microondas, incluso siendo de las más básicas (tecnología microstrip sobre PCB), así como los instrumentos empleados para la medida de los circuitos son nuevos para él y conlleva un elevado número de horas de dedicación.

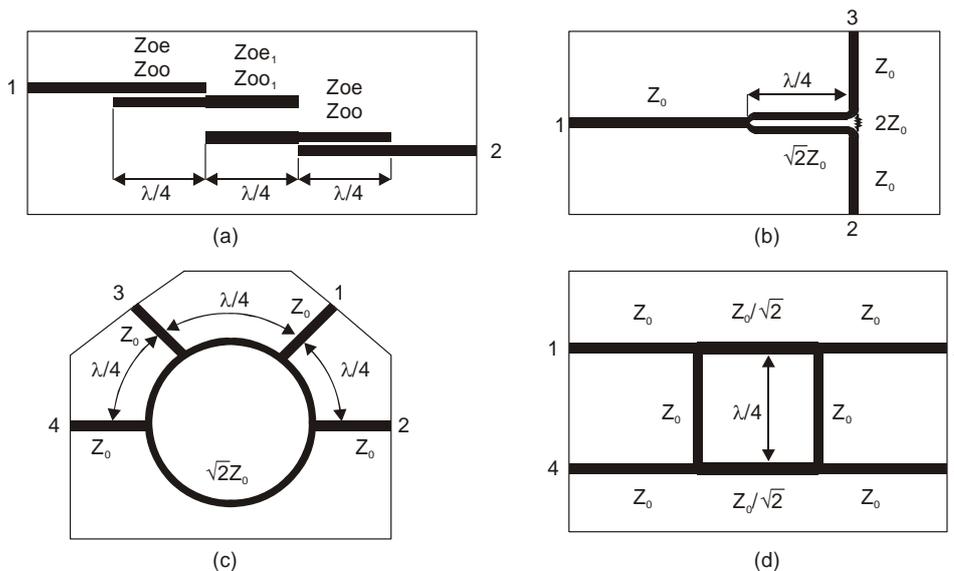
Para lograr estos objetivos se plantea a los estudiantes una serie de prácticas con circuitos activos y pasivos de microondas.

En este trabajo exponemos la serie de prácticas con elementos pasivos. Los circuitos que se proponen son: el divisor de potencia Wilkinson [2], el acoplador ramal [3], el filtro de líneas acopladas [4] y el acoplador en anillo [5]. Se eligen por tratarse de circuitos pasivos que resultan muy útiles para entender el comportamiento de parámetros distribuidos que presentan las vías, y además, en combinación con elementos activos, forman parte de circuitos más complejos tales como amplificadores, mezcladores, transmisores y receptores.

Lo ideal sería que todo estudiante diseñara, montara y verificara cada uno de los circuitos propuestos. Sin embargo, por los problemas de planificación temporal de tareas mencionados anteriormente, esto resulta materialmente imposible. Existen métodos docentes [6] en los cuales se propone que el alumno o grupo de alumnos elija uno de estos circuitos y, con ayuda de un laboratorio de investigación próximo, el alumno cubra todas las etapas desde el diseño hasta la verificación del circuito. En nuestro caso hemos optado por otro procedimiento. En concreto, las prácticas presentadas a los estudiantes han sido planificadas previamente en el seno de un trabajo de fin de carrera de un estudiante, bajo la supervisión de un profesor tutor. El objeto de este trabajo fue el de simular y cuantificar la labor que debería realizar un estudiante a la hora de diseñar, montar y verificar sus prácticas de asignatura. Fruto de este estudio se llegó a la conclusión de que era preferible que el alumno diseñe, y verifique varios circuitos, eliminando de este proceso la parte más mecánica y técnica, no la tecnológica, que consiste en el montaje del circuito. En cierta forma ésta es la parte que puede ser común a otras asignaturas de su carrera. Se optó por tanto por el diseño de varios circuitos para que el alumno tenga una visión más amplia de la electrónica de microondas. Para poder verificar el diseño sin haberlo montado se hace uso de circuitos similares montados en el seno de trabajos fin de carrera. De esta forma se fomenta así el trabajo en grupo. Al fin y al cabo un circuito electrónico es fruto de la labor de varios equipos que trabajan de forma coordinada. Unos se encargan del diseño del circuito, otros del diseño del layout, otros de fabricarlo y otros de verificar su funcionamiento.

### 3. Circuitos pasivos de microondas como prácticas de alumnos.

Los circuitos que se proponen a los estudiantes para ser diseñados en función de una serie de especificaciones (frecuencia central, ancho de banda, relación de onda estacionaria, impedancia característica) y, posteriormente, verificados experimentalmente en el laboratorio son los siguientes:



**Figura 1.** a) Filtro líneas acopladas. b) Divisor de potencia Wilkinson. c) Acoplador en anillo. d) Acoplador ramal.

El filtro de líneas acopladas (Fig. 1.a) es útil si se desea filtrar la banda de una señal para implementar un receptor.

El divisor de potencia de Wilkinson (Fig. 1.b) proporciona dos señales iguales en fase, tiene los tres puertos adaptados y los dos puertos de salida están aislados entre sí.

El acoplador en anillo (Fig. 1.c) es un componente usado para obtener dos señales de la misma potencia y un desfase de 180°. Es un componente básico en mezcladores balanceados.

El acoplador ramal (Fig.1.d) es un componente usado para obtener dos señales de la misma potencia y un desfase de 90°. Es un componente básico en mezcladores balanceados, discriminadores de frecuencia y desfasadores.

Las etapas que deben cubrir los estudiantes en cada uno de estos circuitos son las siguientes.

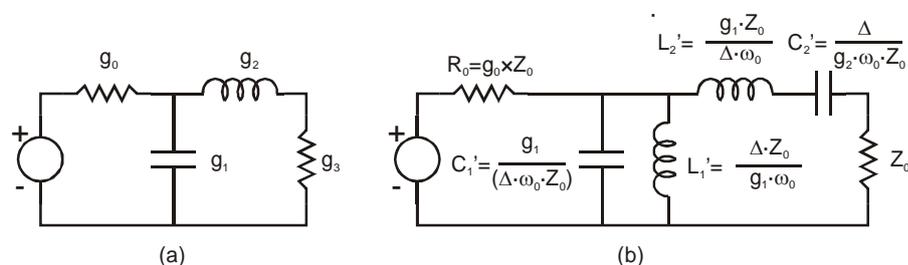
- Diseño del circuito empleando una tecnología al alcance de todos. Los circuitos se realizarán con líneas microstrip montadas sobre PCB.
- Simulación de los diseños empleando un programa de sencillo manejo y ejecución. Para ello nos decidimos por el conocido programa de simulación de circuitos de microondas "Puff" [7].
- Verificación experimental de los circuitos. Si no se dispone de instrumentos de medida costosos como son los analizadores escalares, se puede fijar la frecuencia de diseño por debajo de 1GHz y usar equipos más asequibles como un generador de señal (HAMEG HM8134) y un analizador de espectro (Tektronix 2711).

#### 4. Trabajo y resultados de los estudiantes.

En este apartado se muestra el trabajo seguido por los estudiantes en uno de los diseños mencionados anteriormente, en concreto el filtro paso banda con líneas acopladas con los siguientes parámetros de diseño: filtro paso banda de orden 2 con frecuencia de paso  $f_0=900\text{MHz}$ , respuesta máximamente plana, un ancho de banda del 3%,  $\Delta=0.03$ , e impedancia característica  $Z_0=50\Omega$ . Las variables de diseño que deben determinar son la anchura, longitud y separación de las líneas acopladas. Como parámetros tecnológicos se les suministra el espesor y la constante dieléctrica del sustrato. Las etapas de diseño del filtro se detallan a continuación.

##### 4.1. Diseño teórico

En primer lugar se diseña un filtro paso banda con componentes discretos que se adapte a las especificaciones de partida. Para ello, mediante tablas de filtros con componentes localizados [1], se pueden obtener los valores normalizados de los componentes ( $g_1$ ,  $g_2$  y  $g_3$ ) que se han de usar para implementar un filtro paso baja de respuesta máximamente plana (Fig. 2a).



**Figura 2.** a) Filtro paso baja orden 2 de elementos localizados cuyos valores son obtenidos para una respuesta máximamente plana [1]. b) Filtro paso banda orden 2 de elementos localizados cuyos valores son obtenidos para una respuesta máximamente plana.

Definiendo una nueva variable  $\omega'$ :

$$\omega' = \frac{1}{\Delta} \left( \frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right), \quad \omega_o = \sqrt{\omega_1 \omega_2}, \quad \Delta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}, \quad (1)$$

se puede obtener un filtro paso banda con la misma respuesta que el filtro paso baja de la figura 2a, donde  $\omega_o$  es la frecuencia de paso del filtro y  $\omega_1, \omega_2$  son las frecuencias de corte. De esta forma el filtro paso banda equivalente con elementos localizados una vez desnormalizado será como el que se muestra en la figura 2b.

Una vez diseñado el filtro paso banda con elementos localizados se puede encontrar su equivalente con líneas acopladas [1]. Las líneas acopladas se caracterizan por dos tipos de excitación: el modo par donde las corrientes en las líneas son iguales en amplitud y dirección; y el modo impar donde las corrientes en las líneas son iguales en amplitud pero de direcciones opuestas. Cada una de ellas se caracteriza por su impedancia equivalente,  $Z_{0e}$  y  $Z_{0o}$ , respectivamente. Estas impedancias son función de la geometría de las líneas objeto final del diseño del filtro. La transformación entre elementos localizados y distribuidos se rige por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} Z_{0ei} &= Z_0 [1 + J_i Z_0 + (J_i Z_0)^2] \\ Z_{0oi} &= Z_0 [1 - J_i Z_0 + (J_i Z_0)^2] \end{aligned} \quad (2)$$

Donde  $i=1, 2, 3$  e indica el orden de las parejas de líneas y  $J_i Z_0$  toma los valores:

$$J_1 Z_0 = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_1}}, \quad J_2 Z_0 = \frac{\pi \Delta}{2\sqrt{g_1 g_2}}, \quad J_3 Z_0 = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_2}} \quad (3)$$

Combinando los valores de  $g_i$  con las especificaciones del filtro,  $\Delta$  y  $Z_0$ , y las Ec. (2) y (3) se pueden determinar las impedancias características par e impar de cada pareja de líneas acopladas. Finalmente, haciendo uso del modelo propuesto por Garg y Bahl [8] podemos obtener la anchura, separación y longitud de las líneas. Para este caso particular  $g_1$  y  $g_2$  son iguales [1], por lo que las parejas de líneas acopladas 1 y 3 también lo serán y por tanto el filtro será simétrico, tal y como se observa en la figura 1a.

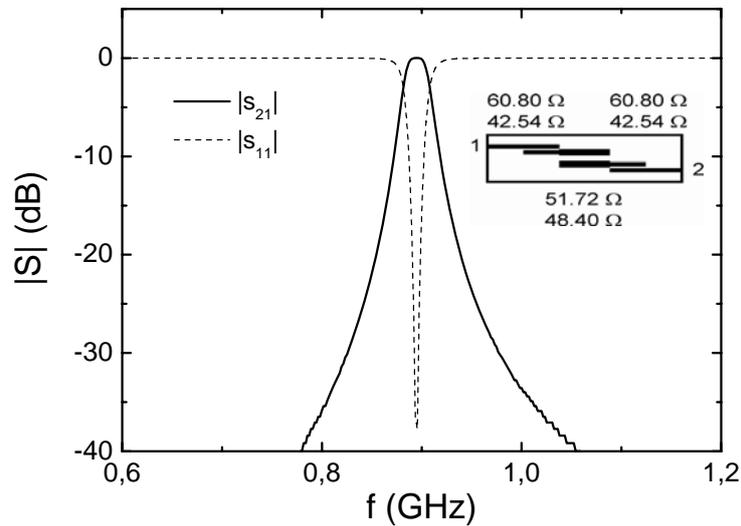
#### 4.2. Simulación numérica

Una vez concluido la parte teórica los estudiantes proceden a simular el circuito mediante un programa de fácil manejo [7]. En la figura 3 se muestran los resultados de esta simulación. En ella se representa el módulo del coeficiente de transmisión del filtro,  $|S_{21}|$ , y el módulo del coeficiente de reflexión de una de las puertas,  $|S_{11}|$ . Hay que destacar la simetría del circuito. De la figura se puede observar cómo se cumplen las especificaciones del diseño: frecuencia de paso a 900 MHz y ancho de banda del 3%.

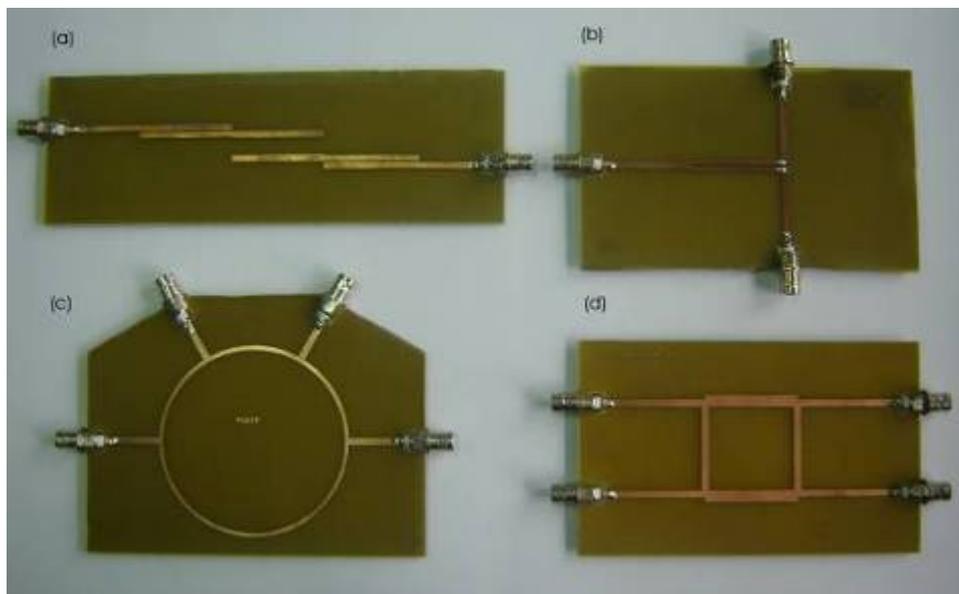
#### 4.3. Trabajo de laboratorio

Realizado el diseño teórico y la simulación de los circuitos, se procede al trabajo de laboratorio. Como hemos justificado en apartados anteriores se propone la realización de medidas sobre unos circuitos ya implementados por estudiantes de cursos precedentes. En este caso fueron fruto de un trabajo fin de carrera en la titulación de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Granada (Fig. 4).

Dada la simetría del filtro, para medir el parámetro de transmisión  $|S_{21}|$  se utiliza un analizador de espectro, conectado a un puerto, y el generador de señal, conectado al otro. Los resultados de esta medida se representan en la figura 5 y se comparan con los resultados obtenidos por el simulador.



**Figura 3.** Simulación mediante el programa Puff del filtro diseñado teóricamente. Los resultados más característicos son: máxima transmisión ( $|S_{21}|_{dB} = -0.2$  dB) a  $900$  MHz y frecuencias de corte situadas a  $883$  MHz y  $910$  MHz. En el recuadro se muestra el circuito con las impedancias par e impar para cada par de líneas.



**Figura 4.** Circuitos prácticos correspondientes a los diseños teóricos de la Figura 1.

Del análisis de estos resultados los estudiantes pueden sacar las siguientes conclusiones:

-El circuito se comporta como un filtro paso banda como muestra la campana de medidas experimentales (Fig. 5). A la frecuencia de paso se obtiene un máximo en el parámetro de transmisión  $|S_{21}|$  y para el resto de frecuencias se va atenuando la señal que llega al puerto de salida.

-Sin embargo, hay una disminución del coeficiente de transmisión a la frecuencia de paso respecto a las predicciones teóricas. La propia frecuencia de paso sufre un desplazamiento respecto al valor teórico.

-Por el contrario, el ancho de banda  $\Delta=0.032$ , medido entre las frecuencias de corte, sí se ajusta a las predicciones teóricas y a las especificaciones.

Dado que al estudiante se le proporcionan unos datos tecnológicos del sustrato sobre el que no puede actuar físicamente (constante dieléctrica del sustrato, espesor del mismo, dimensiones reales de las líneas) se les ofrece la posibilidad de modificarlos durante la etapa de simulación del circuito. Así, se les pide que analicen y vean como repercuten en el comportamiento del circuito los siguientes parámetros: longitud de las líneas, anchura, separación entre ellas, constante dieléctrica y espesor del sustrato. El objetivo es que sin llegar a montar físicamente el circuito los estudiantes sean capaces de localizar los parámetros tecnológicos que hacen que un diseño práctico se desvíe del teórico y por tanto sean capaces de encontrar solución y mejorar el diseño. En concreto en esta experiencia fueron capaces de determinar que el desplazamiento de la frecuencia de paso es debido a: un error en la longitud de la línea (0,8mm es suficiente); a un sustrato rugoso de espesor variable; a una constante dieléctrica distinta de la nominal. En cuanto a la atenuación de la señal esto es debido a las pérdidas en el cable de medida, a la finita conductividad del conductor del que están hechas las pistas, a las pérdidas en el dieléctrico y a la falta de encapsulamiento de la placa.

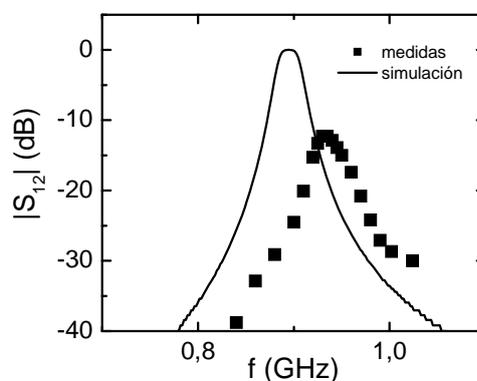


Figura 5. Módulo del parámetro de transmisión en función de la frecuencia para el filtro de líneas acopladas.

## 5. Circuitos pasivos en sistemas de comunicación. Mezclador doble balanceado y receptor de conversión directa.

Las prácticas con los circuitos pasivos siempre se presentan como primer paso para el diseño e implementación de otros sistemas más complejos que se pueden abordar como trabajo fin de carrera. A continuación se van a comentar brevemente dos sistemas usados en las comunicaciones comerciales que necesitan de los circuitos estudiados por los alumnos. El objetivo es mostrar a los estudiantes cómo su trabajo tiene continuidad en circuitos más complejos y a la vez reales.

La utilidad de los acopladores ramal y en anillo la podemos encontrar en los mezcladores, sistemas que combinan dos señales de distinta frecuencia. En los receptores tales como antenas de teléfonos

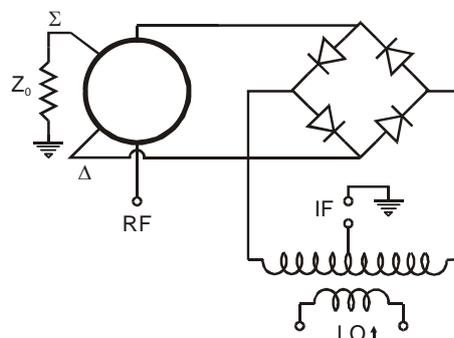
móviles o de televisión las entradas del receptor la constituyen una señal débil de radiofrecuencia con frecuencia  $f_{RF}$  y la señal de un oscilador local  $f_{LO}$ . Estas dos entradas son combinadas (mezcladas) para producir una señal de frecuencia intermedia  $f_{IF} = (f_{RF} - f_{LO})$  y otra de frecuencia mayor ( $f_{RF} + f_{LO}$ ) que será filtrada. La ventaja de esta transformación es que la frecuencia intermedia  $f_{IF}$  es suficientemente alta para que en los amplificadores se elimine el ruido  $1/f$  de forma que podemos disponer de amplificadores con buenas características tanto en ruido como en sensibilidad. El uso de los mezcladores mejora los receptores de detección directa pues tiene la ventaja de sintonizar una banda completa con sólo cambiar la frecuencia del oscilador local.

Los mezcladores más simples tienen el inconveniente de manejar todos los armónicos generados por la combinación de la señal de radiofrecuencia y la del oscilador, pero los circuitos no se pueden diseñar para una adaptación en un rango tan amplio de frecuencias y como resultado se obtienen unas pérdidas de conversión enormes en las terminaciones resistivas.

El uso de acopladores (ramal o en anillo) permite la construcción de nuevos mezcladores más complejos llamados balanceados que combinan 2 o más mezcladores simples mediante un acoplador ramal o en anillo para conseguir menores pérdidas y un mejor aislamiento RF/LO. Los mezcladores balanceados también cancelan ruido AM generado por el oscilador local.

El mezclador balanceado usando un acoplador en anillo elimina todos los armónicos pares del oscilador local. El doble balanceado elimina los armónicos pares tanto del oscilador local como de la señal de RF lo cual lleva a unas pérdidas de conversión muy bajas y un excelente aislamiento RF/LO.

Por tanto uno de los circuitos que se muestran en forma de seminario a los alumnos, como continuación de su trabajo, es el mezclador doble balanceado [1] (Fig. 6):



**Figura 6:** Mezclador doble balanceado usando el acoplador en anillo.

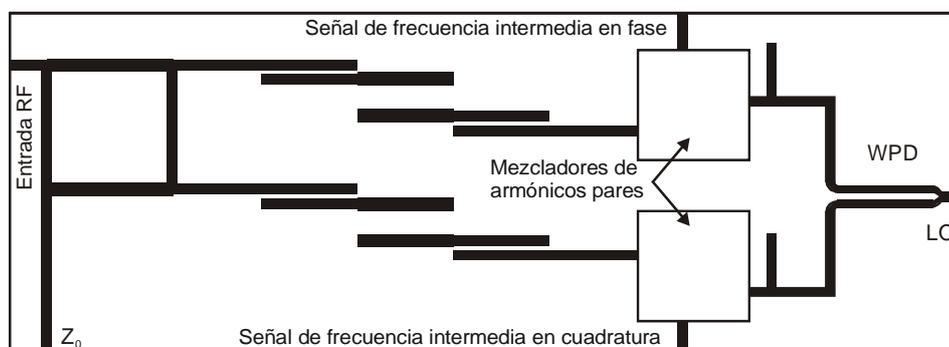
Con objeto de mostrar a los alumnos las aplicaciones reales que tienen tanto el filtro paso banda como el divisor de potencia de Wilkinson, se presenta a los alumnos la realización de un receptor de conversión directa [9] (Fig. 7)

Este receptor nace como respuesta a la creciente demanda de ancho de banda en las comunicaciones de telefonía móvil junto con un menor coste. Como respuesta a estas exigencias se reduce la complejidad de los circuitos al eliminar la parte de frecuencias intermedias, y se dobla el ancho de banda usando la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK).

Interpretando la fase de la señal con procesadores digitales (DSP) se consigue un aumento de la información por ancho de banda y para ello necesitamos usar el acoplador ramal de forma que obtengamos la señal y su versión desfasada 90°.

Las limitaciones de los dispositivos de estado sólido hacen que a medida que aumenta la frecuencia sea más difícil obtener potencia, esto se traduce en osciladores locales caros para frecuencias altas. Una forma de abaratar costes es usar el mismo oscilador local para la señal recibida y su análoga en cuadratura usando un divisor de potencia de Wilkinson. Se usan filtros paso banda y paso baja para limitar las señales al rango de frecuencias deseado.

El otro componente que falta por comentar es el mezclador de armónicos pares. Está formado por dos diodos en antiparalelo y aprovecha la no linealidad de éstos para eliminar los armónicos impares de la señal de radiofrecuencia y algunos armónicos pares del oscilador local por lo que disminuye el ruido introducido por el oscilador local y las pérdidas por conversión.



**Figura 7:** Receptor de conversión directa QPSK para comunicaciones inalámbricas.

## 6. Conclusiones.

En esta comunicación se ha descrito a grandes rasgos el diseño, simulación y medida de circuitos pasivos de microondas como herramienta pedagógica para la iniciación al diseño de sistemas de alta frecuencia. Para evitar la necesidad de laboratorios con equipos caros (como pueden ser los analizadores escalares a altas frecuencias), se han propuesto cuatro circuitos pasivos básicos que permiten ser fácilmente implementados con tecnología microstrip, simulados con programas de ordenador no complejos y medidos con equipos asequibles. Se ha justificado su uso en sistemas reales de comunicación.

Los circuitos pasivos fabricados, se han utilizado en las prácticas de asignaturas de grado con resultados satisfactorios, siendo de gran ayuda para que los estudiantes capten eficientemente los diferentes aspectos de la teoría de elementos pasivos en circuitos de microondas. Finalmente se ha mostrado en este trabajo la labor que realizan los estudiantes en el proceso de diseño de uno de estos circuitos y la continuidad de su trabajo en circuitos reales.

## Referencias

- [1] D.M. Pozar. *Microwave Engineering*. New York: Wiley, (1998).
- [2] M.C. Scardelletti.; G.E. Ponchak.; T.M. Weller. *Miniaturized Wilkinson Power Dividers Utilizing Capacitive Loading*, *IEEE Microwave and wireless components letters*, vol. 12, N° 1, 6-8 (2002).

- [3] K.O. Sun.; S.J. Ho.; C.Yen.; D.Weide. *A Compact Branch-Line Coupler using discontinuous Microstrip Lines*, *IEEE Microwave and wireless components letters*, vol. 15, N° 8, 519- 520 (2005).
- [4] M.C. Velazquez-Ahumada.; J.Martel.; F.Medina. *Parallel Coupled Microstrip Filters With Ground-Plane Aperture for Spurious Band Suppression and Enhanced Coupling*, *IEEE. Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, N° 3, 1082-1086 (2004).
- [5] M.L.Chuang. *Miniaturized Ring Coupler of Arbitrary Reduced size*, *IEEE Microwave and wireless components letters*, vol. 15, N° 1, 16-18 (2005).
- [6] I. Huynen, R. Platteborze, D. Vanhoenacker-Janvier and A. Vander Vorst, *Short-term project on microwave passive planar circuits: an educational approach*, *IEEE Trans. Educ.*, vol. 43, N° 2, 227-236 (2000).
- [7] S.W. Wedge, R.Compton, and D.Rutledge, *PUFF: Computer-Aided Design for Microwave integrated circuits*. Pasadena, CA: Caltech, (1991).
- [8] R.Garg and I. J. Bahl, *Characteristics of coupled microstriplines*, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech*, vol. MTT-27, N° 7, 700-705 (1979).
- [9] N.C. Karmakar. *A QPSK direct-conversion receiver for wireless communications*, *International Journal of RF and Microwave computer-aided engineering*, vol, 15, N° 1, 31-43 (2005).