

Sintonización automática de filtros de microondas mediante motores a pasos

Josep Benet-Freissinier

Universitat Politècnica de Catalunya, ETSETB, España.

e-mail: josepbenet84@gmail.com

Ignacio Llamas-Garro

Centre Tecnològic de Telecomunicacions

de Catalunya, España.

e-mail: llamas@ieee.org

Zabdiel Brito-Brito

Instituto Politécnico Nacional, ESIME, México.

e-mail: zabdiel.brito@ieee.org

Rosa M. Fernández-Canti

Universitat Politècnica de Catalunya, Dept. TSC, España.

e-mail: rfernandez@tsc.upc.edu

Abstract - Este artículo describe un sistema para sintonizar filtros de microondas de manera automática. Se presentan los resultados obtenidos de la sintonización automática de un resonador de microondas mediante un sistema diseñado específicamente para tal propósito. Este sistema es extrapolable a filtros de microondas que requieren múltiples tornillos de sintonización. El sistema diseñado se encarga de pedir al usuario los datos necesarios, procesar las medidas realizadas y finalmente hacer girar un motor a pasos para conseguir el ajuste deseado de frecuencia de resonancia. El tornillo de sintonización está unido al motor a pasos, y al girar el motor se hace variar la frecuencia del resonador. Dependiendo del paso del motor se podrá conseguir mayor precisión en el ajuste, pero lo que se mejora sustancialmente es el tiempo invertido en la sintonía y la velocidad a la que se puede cambiar la respuesta del dispositivo.

Keywords: sintonización automática, autoajuste, motor a pasos, filtro microondas, resonador microondas.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de componentes de microondas inteligentes capaces de ajustar sus parámetros de operación automáticamente es cada vez mayor. Ejemplo de ello son los filtros reconfigurables capaces de ajustar sus parámetros para diversas aplicaciones móviles terrestres o satelitales. Otro ejemplo son los filtros que pueden adaptarse a pequeños desajustes de la frecuencia central causados principalmente por tolerancias de fabricación y cambios climáticos.

Los filtros reconfigurables de microondas pueden dividirse en dos grupos, filtros con sintonía discreta y filtros con sintonía continua [1]. Los filtros que presentan sintonía discreta generalmente usan diodos PIN [2] o interruptores MEMS [3]. Mientras que los filtros con sintonía continua usan diodos varactores [4], varactores MEMS [5], materiales ferro-eléctricos [6] o materiales ferro-magnéticos [7]. Algunas topologías pueden mezclar sintonía discreta y continua [8].

En este artículo se presenta el diseño e implementación de un sistema que realiza la sintonización automática de un resonador de microondas. Este sistema integra un circuito que controla un motor a pasos encargado de mover el tornillo metálico de sintonización de la frecuencia central del resonador de microondas. Los tornillos de ajuste se usan frecuentemente para compensar tolerancias de fabricación, en donde los tornillos son girados manualmente mientras se monitorea la respuesta medida.

Para diversas aplicaciones, las bandas de transmisión y recepción son cada vez más estrechas y esto hace que el ajuste de las mismas se convierta en una parte importante a tener en cuenta en todo sistema de transmisión/recepción. La versatilidad que puede ofrecer un dispositivo capaz de autoajustar sus características es de gran interés sobre todo para dispositivos capaces de procesar diversas aplicaciones.

Los filtros de microondas tienen múltiples tornillos de sintonía utilizados para ajustar la respuesta del dispositivo. Este artículo demuestra un sistema capaz de ajustar la frecuencia central de un resonador de

microondas de forma totalmente autónoma, y los resultados obtenidos permiten escalar el dispositivo presentado para incluir más de un resonador en el futuro.

A continuación se expone la solución implementada capaz de actuar sobre tornillos de sintonización mediante motores a pasos y que permitan el ajuste de la frecuencia de resonancia de un dispositivo de microondas [9].

2. AJUSTE AUTOMÁTICO DE LOS TORNILLOS DE SINTONÍA DE UN FILTRO DE MICROONDAS

Algunos dispositivos de microondas como filtros y resonadores disponen de tornillos de sintonización que actúan sobre distintos parámetros, como por ejemplo la frecuencia central, el ancho de banda o la selectividad [1]. Actuando sobre cada uno de estos tornillos se consigue modificar el valor del parámetro que ajustan y permitir una correcta configuración del dispositivo según la aplicación.

Tradicionalmente el ajuste de estos tornillos y por lo tanto de los parámetros, se realiza manualmente con un destornillador y un analizador de redes que permite medir los parámetros S del dispositivo bajo prueba.

Este tipo de sintonización manual de tornillos requiere mucho tiempo y gran precisión por parte del personal técnico que los ajusta. La metodología y técnica expuesta en este artículo permite el ajuste automático de los filtros de microondas mediante la introducción de parámetros en un *software* [9].

La Fig. 1 ilustra la respuesta de un filtro de microondas de cuatro resonadores. El ajuste de la frecuencia central del filtro se realiza mediante la sintonía de la frecuencia central de cada resonador. Para obtener una respuesta óptima, los resonadores deben ser sintonizados a la misma frecuencia resonante (deben ser sintonizados individualmente a la frecuencia central del filtro: 8,5 GHz). La interacción entre los resonadores por medio de acoplos electromagnéticos crea las cuatro resonancias ilustradas en la Fig. 1.

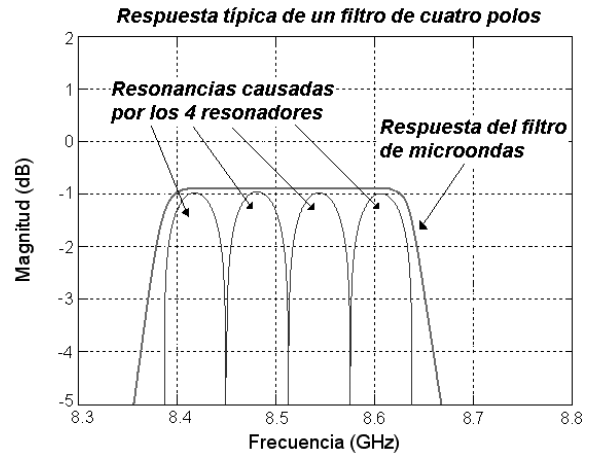


Fig. 1: Resposta de un filtro de microondas compuesto de cuatro resonadores.

El objetivo a conseguir mediante este sistema es el ajuste de la frecuencia central de un resonador de microondas de forma totalmente autónoma y automática. Para conseguir tal fin y actuar sobre los tornillos de ajuste, se utilizan motores a pasos ya que son baratos y actualmente ofrecen pasos inferiores a los $1,8^\circ$ por paso. Las medidas se realizan con un analizador de redes vectorial, y el control de ajuste se realiza en un *software* desarrollado específicamente [9] y ubicado en un ordenador externo.

El sistema implementado actúa de la siguiente forma: el *software* de control recibe los valores medidos por el analizador de redes mediante un bus de comunicación y los procesa para calcular el valor de la frecuencia de resonancia del circuito. Una vez analizado el parámetro, se toma la decisión de enroscar o desenroscar el tornillo para lograr el valor de frecuencia de resonancia deseado. Pero antes de actuar sobre el motor que acabará haciendo girar ese tornillo, se precisa de una circuitería externa a modo de *driver* que proporcione las corrientes necesarias a las fases del motor. Para comunicar este *driver* con el *software* de control, se incluye un *firmware* ubicado en un microcontrolador que se comunica con el *software* de control y gestiona los giros de los diferentes motores [9].

En la Fig. 2 se muestran las conexiones entre los diferentes elementos que componen el sistema implementado y los cableados necesarios para la sintonización de un filtro de microondas compuesto de varios resonadores.

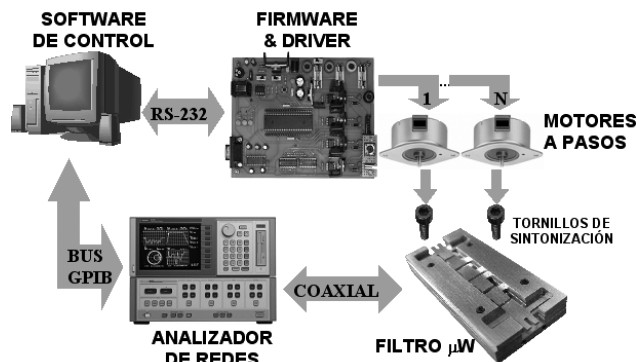


Fig. 2: Sistema diseñado para la sintonía automática de un filtro de microondas.

3. SINTONIZACIÓN AUTOMÁTICA DE UN RESONADOR DE MICROONDAS

Siguiendo el esquema mostrado en la Fig. 2, se ha desarrollado un sistema capaz de sintonizar automáticamente la frecuencia central o resonante de un resonador de microondas en la banda de 6 GHz a 9 GHz. El dispositivo elegido para la realización práctica es un resonador coaxial de un cuarto de longitud de onda realizado en cobre que permite variar su frecuencia de resonancia mediante un tornillo de sintonización ubicado encima del resonador (véase Fig. 3). Variando la profundidad de penetración se consigue modificar la frecuencia de resonancia.

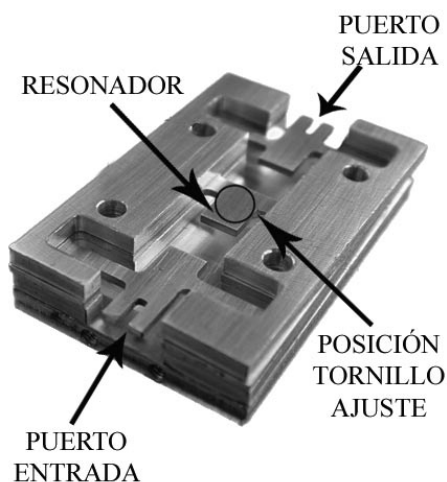


Fig. 3: Vista interior del resonador sintonizable entre 6 GHz y 9 GHz.

Este resonador permite estudiar de forma inequívoca la variación de frecuencia central debido al giro del tornillo de sintonización, que a su vez es actuado por el motor a pasos siguiendo las órdenes del *software* de control. En la Fig. 4 se muestra la respuesta del resonador a la frecuencia de 7,125 GHz.

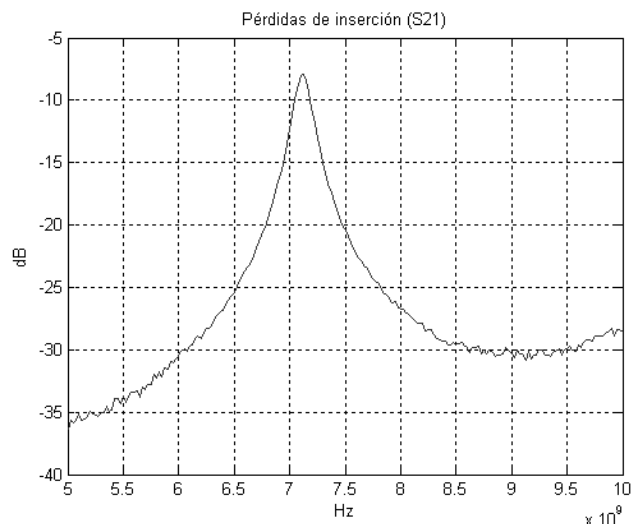


Fig. 4: Pérdidas de inserción del resonador a la frecuencia de 7,125 GHz.

El *software* de control que gestiona la sintonización automática del resonador se ha desarrollado en Matlab™ y se encarga de recibir las medidas de los parámetros S del analizador de redes por bus GPIB y enviar las órdenes de giro al *firmware* mediante el puerto serie [9].

El *software* de control tiene las siguientes funcionalidades:

- Petición al usuario de los datos necesarios: frecuencia a sintonizar el resonador, dirección GPIB del analizador de redes, rango frecuencial de la medida, número de puntos de la medida y directorio para guardar los resultados.
- Obtención de la medida S_{21} del analizador de redes vía bus GPIB.
- Cálculo de la frecuencia central.
- Decisión de subir o bajar de frecuencia para sintonizar el dispositivo o detener la sintonización si se ha alcanzado la frecuencia deseada y mostrar los resultados.
- Envío de órdenes al *firmware* para actuar sobre el motor.
- Esperar la confirmación del *firmware* de que el giro se ha realizado correctamente.
- Gestión de errores.

Este bucle de obtención de la medida, cálculo de la frecuencia central, toma de decisión y envío de órdenes al *firmware* se repite hasta conseguir sintonizar el dispositivo a la frecuencia deseada por el usuario o cometer el mínimo error posible teniendo en cuenta la respuesta frecuencial del dispositivo y el mínimo paso del motor.

El *firmware*, que recibe las órdenes del *software* de control, está ubicado en un microcontrolador que habilita la activación de sus pins en función de las órdenes recibidas. Esta activación de los pins hará que unos transistores de potencia suministren la corriente necesaria a las fases del motor y realizar el giro.

En la placa de circuito impreso diseñada para tal propósito también existen otras circuiterías auxiliares que aportan versatilidad y autonomía al proyecto, como por ejemplo el circuito programador ICD2 para el microcontrolador, una tensión regulable o unos pulsadores de paro a modo de emergencia [9].

Para ajustar el tornillo de sintonización del resonador con el eje del motor, se tuvo que diseñar un anclaje estándar para poder adaptar diferentes tipos de punteras al motor y poder abarcar un mayor número de dispositivos. También se diseñó una estructura de soporte que sostiene el motor encima del resonador mediante unos muelles y permite el ajuste entre ambos.

4. RESULTADOS

Mediante el sistema diseñado se ha conseguido sintonizar el resonador de forma totalmente automática y precisa. Se realizaron diferentes sintonizaciones tanto ascendentes como descendentes de frecuencia y siempre se consiguió sintonizar el resonador a la frecuencia deseada o lo más próxima a ella posible con el menor error que permite el sistema.

El sistema permite obtener el máximo rango de sintonía del resonador y hacer un barrido de todo el rango de frecuencias sintonizables para obtener la gráfica que muestra la evolución de la frecuencia central en cada paso (véase Fig. 5).

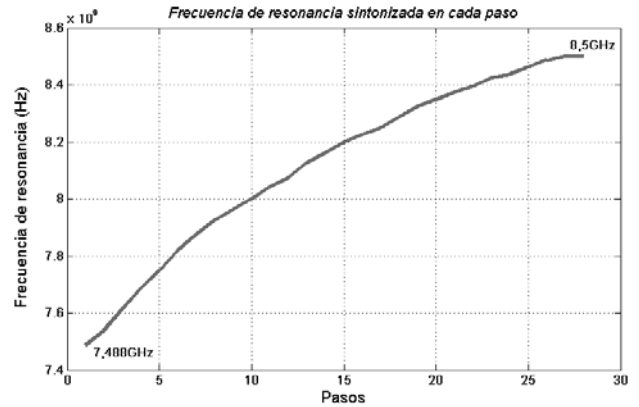


Fig. 5: Rango de frecuencias sintonizables por el resonador utilizado en la implementación práctica del sistema.

La gráfica anterior es útil para determinar el paso del motor necesario, ya que si la variación de frecuencia es muy grande en un rango determinado, se precisa de un paso motor pequeño para sintonizar con precisión una frecuencia dentro de este mismo rango. Sin embargo, si el incremento de frecuencia es menor, un paso pequeño del motor ralentizará el proceso de sintonización ya que en muchas ocasiones no se percibirá incremento de frecuencia entre pasos consecutivos.

En la Fig. 6 se puede ver el resultado de la sintonización automática del resonador a 8,5 GHz partiendo de una frecuencia aleatoria de 7,488 GHz. Esta frecuencia de 8,5 GHz se corresponde con la frecuencia central de un filtro de cuatro resonadores ilustrada en la Fig. 1, y por lo tanto, el estudio de la sintonización de un resonador a esta frecuencia facilitará en un futuro la sintonización del filtro con cuatro resonadores.

La Fig. 6 muestra la evolución de la frecuencia de resonancia del resonador en los diferentes pasos realizados durante la sintonización automática.

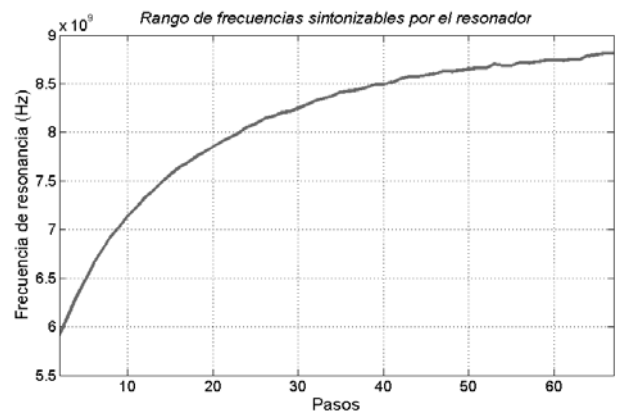


Fig. 6: Sintonización automática del resonador a 8,5 GHz partiendo de una frecuencia aleatoria de 7,488 GHz.

Como puede observarse, el sistema interpreta correctamente las medidas realizadas en el analizador de redes y toma la decisión de subir de frecuencia e ir aproximándose a la frecuencia de 8,5 GHz. En todo momento se distingue el incremento de la traza aunque en algunos pasos más que en otros. Este fenómeno se debe a la variación no lineal de frecuencia que posee el resonador, característica intrínseca e invariable del dispositivo una vez insertado el tornillo de sintonización.

A la vista de los resultados obtenidos se puede llegar a la conclusión de que existe un compromiso entre la precisión de la medida de frecuencia de resonancia por parte del analizador de redes, la característica frecuencial del dispositivo bajo estudio y el paso del motor utilizado.

Para una correcta sintonización del dispositivo se debe tener en primer lugar la suficiente precisión en el analizador de redes para medir la frecuencia a sintonizar de manera correcta. Pero la precisión del analizador de redes depende del rango de frecuencias a medir y el número de puntos dentro de este rango. Si se hace fijo el rango de medida porque se desea visualizar todo el rango de frecuencias sintonizables por el dispositivo, solamente queda modificar el número de puntos de la medida para aumentar la precisión. Este número de puntos influye en el tiempo que toma el analizador de redes para realizar la medida.

Una vez establecida la precisión de la medida, debe estudiarse el incremento de frecuencia entre pasos consecutivos en un entorno próximo a la frecuencia a sintonizar. El incremento de frecuencia entre pasos consecutivos debe ser menor o igual a la precisión establecida por el analizador de redes, de lo contrario, la sintonización no será todo lo correcta posible. En este punto entra en juego el paso del motor y la característica frecuencial del dispositivo de microondas. Como se ha comentado anteriormente, el dispositivo de microondas posee una característica frecuencial determinada e invariable y por lo tanto solamente se puede modificar el paso del motor para determinar el incremento frecuencial entre pasos.

A priori no se puede determinar con exactitud el paso necesario para no exceder la precisión

establecida, pero se puede estimar un primer valor suponiendo que la variación de frecuencias es lineal en todo el rango de frecuencias sintonizables. Por ejemplo, en el caso particular del resonador se tiene una variación total de frecuencia de 3 GHz con 1,7 vueltas del tornillo de sintonización (véase Fig. 5). Si la precisión de la medida es de 50 MHz, se requiere un paso menor o igual a 10,2 grados/paso.

Como es de esperar, la característica frecuencial del dispositivo de microondas no suele ser lineal, así que debe modificarse este valor teniendo en cuenta la variación de frecuencia en el entorno de la frecuencia a sintonizar. Es decir, si en este entorno la pendiente es mayor que la establecida en la estimación, el paso debe ser menor. Si la pendiente es menor, el paso puede ser mayor. Se puede volver a estimar un valor tomando unos límites más cercanos a la frecuencia a sintonizar, pero resulta difícil determinar con precisión ocular el número de vueltas que da el tornillo de sintonización. Es por eso que en este punto se puede escoger un motor con un paso menor al estimado la primera vez y hacer pruebas con él. Gracias a que sabemos el paso de este motor, se puede determinar exactamente la cantidad de grados que ha girado y volver a estimar, si es necesario, el paso requerido para conseguir la precisión.

Como es lógico, el paso del motor será óptimo en un entorno cercano a la frecuencia a sintonizar, pero si cambiamos esta frecuencia se puede perder la precisión conseguida, o por el contrario, ralentizar el sintonizado con incrementos nulos entre pasos consecutivos. Aún así, si el paso debe ser óptimo para todas las frecuencias sintonizables por el dispositivo de microondas, debe estudiarse el rango de mayor pendiente y escoger el paso óptimo que permita garantizar la precisión en este mismo rango.

5. CONCLUSIONES

Se ha demostrado mediante resultados experimentales la sintonización en frecuencia de un resonador de microondas. El sistema diseñado ilustrado en la Fig. 2 es aplicable a cualquier resonador de microondas con ajuste mediante tornillos de sintonización, siempre y cuando sea posible el emplazamiento de los motores sobre los tornillos a ajustar.

Es necesario el diseño de un *software* de control específico para cada dispositivo de microondas en función de los parámetros a ajustar y el instrumento de medida elegido. Debe tenerse en cuenta que, en ocasiones, la modificación de un parámetro puede influir en otros, y por lo tanto en estos casos, deben reajustarse en cada paso todos los parámetros. Un estudio meticuloso de las relaciones entre los diferentes parámetros y el diseño de una rutina para actuar sobre ellos parece la mejor opción para el diseño de un *software* de control optimizado. De igual forma es preciso adaptar el diseño de la placa de circuito impreso según la cantidad de motores a pasos necesarios.

Los motores a pasos pueden conseguir pasos muy pequeños que permitan un ajuste muy preciso de los parámetros con consumos contenidos y gran rapidez de ejecución.

La solución de ajuste automático de dispositivos de microondas propuesto en este artículo se basa en la optimización de los recursos a las necesidades de cada dispositivo a ajustar, minimizando los elementos superfluos que pueden ofrecer otros sistemas prediseñados que actúan sobre motores a pasos. A su vez, la integración del *software* de control en entorno MatlabTM ofrece la versatilidad necesaria para adaptarse a los diferentes tipos de buses disponibles en el mercado. La ubicación del *firmware* en el microcontrolador de la placa de circuito impreso garantiza la gestión de errores en la comunicación a la vez que posibilita un entorno de expansión futuro.

El sistema presentado en este artículo sintoniza la frecuencia de un resonador de microondas de manera totalmente automática. En base a estos resultados, nuestro trabajo futuro consiste en expandir el sistema para incluir un mayor número de motores a pasos junto con la creación de un *software* específico que permita sintonizar la respuesta en frecuencia de un filtro de microondas compuesto de varios resonadores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se engloba dentro del proyecto PIB2010BZ-00585 del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España.

Todos los autores agradecen a Aline Jaimes Vera por proporcionar el resonador para realizar el trabajo experimental presentado en este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Z. Brito-Brito, Microwave Integrated Tunable Filters, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [2] Z. Brito-Brito, I. Llamas-Garro, Ll. Pradell, "Precise Frequency and Bandwidth Control of Microstrip Switchable Bandstop Filters", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 51, No. 11, November 2009, pp 2573-2578.
- [3] Hieng Tiong Su, Ignacio Llamas-Garro, Michael J. Lancaster, Martin Prest, Jae-Hyoung Park, Jung-Mu Kim, Chang-Wook Baek, and Yong-Kweon Kim, "Performance of RF MEMS Switches at Low Temperatures", Electronics Letters, Vol. 42, No. 21, October 2006, pp 1219 – 1220.
- [4] Carles Musoll-Anguiano, Ignacio Llamas-Garro, Zabdiel Brito-Brito, Lluís Pradell, Alonso Corona-Chavez, "Fully Adaptable Bandstop Filter using Varactor Diodes", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 52, No. 3, March 2010, pp. 554-558.
- [5] Yun-Ho Jang, Ignacio Llamas-Garro, Zabdiel Brito-Brito, Jung-Mu Kim, Yong-Kweon Kim, "Novel frequency agile electromagnetic decoupling MEMS device", The 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, TRANSDUCERS, Beijing, China, June 5-9, 2011 (aceptado).
- [6] Courreges, S.; Yuan Li; Zhiyong Zhao; Kwang Choi; Hunt, A.; Papapolymerou, J.; "A Low Loss X-Band Quasi-Elliptic Ferroelectric Tunable Filter"; IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 19, no. 4, Apr. 2009, pp. 203 - 205.
- [7] Murakami, Y.; Ohgihara, T.; Okamoto, T.; "A 0.5-4.0-GHz Tunable Bandpass Filter Using YIG Film Grown by LPE"; IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 35, no. 12, Dec 1987, pp. 1192 - 1198.
- [8] B.E. Carey-Smith; P.A. Warr; "Broadband-configurable bandstop-filter design employing a composite tuning mechanism", IET Microwaves, Antennas & Propagation, Vol. 1, No. 2, Apr. 2007, pp. 420 - 426.
- [9] J. Benet-Freissinier, Automatización y control de un motor a pasos para la sintonización de filtros de microondas, Proyecto fin de carrera, Universitat Politècnica de Catalunya 2010.

AUTORES



Josep Benet-Freissinier se licenció como Ingeniero Superior en Telecomunicaciones en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), España, en 2010. Tras realizar prácticas en diferentes empresas multinacionales y licenciarse, actualmente trabaja en el sector privado.



Zabdiel Brito-Brito recibió los grados de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica por parte del Instituto Politécnico Nacional (IPN), México, en 2001 y 2003 respectivamente; y recibió el grado de Doctor en Teoría de la Señal y Comunicaciones (PhD) por parte de la Universidad Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona España, en 2010. El Dr. Brito-Brito se unió al departamento de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica (ICE) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), México, en 2003. Sus principales líneas de investigación son filtros reconfigurables que involucran el control de la frecuencia central, ancho de banda y selectividad; usando diodos y RF MEMS.



Ignacio Llamas-Garro obtuvo el título de doctor por la Universidad de Birmingham, Reino Unido en diciembre del 2003, anteriormente se graduó como ingeniero en electrónica y comunicaciones por la Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Realizó una estancia post-doctoral en el laboratorio para microsensores y actuadores en la Universidad Nacional de Seúl, Corea, al mismo tiempo fue investigador visitante del centro inter-universitario para los semiconductores en la Universidad Nacional de Seúl de marzo 2004 a marzo 2005. Fue profesor asistente bajo el programa Brain Korea (BK) en la universidad Nacional de Seúl de marzo 2005 a marzo 2006. Fue profesor investigador en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en México de mayo 2006 a mayo 2007. Fue investigador Juan de la Cierva en el

departamento de teoría de la señal y comunicaciones en la Universitat Politècnica de Catalunya de mayo 2007 a mayo 2010, actualmente se encuentra en el Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya. El Dr. Llamas-Garro es miembro senior del IEEE, y miembro del IET y EuMA.



Rosa Mª Fernández-Cantí obtuvo el título de Ingeniera Superior en Telecomunicaciones por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), España, en 1994. Actualmente es profesora permanente del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la UPC. Su línea docente y de investigación se centra en la Teoría de Control y Automática en general. Es Member del IEEE y socia de la CEA-IFAC (Comité Español de Automática-International Federation on Automatic Control).