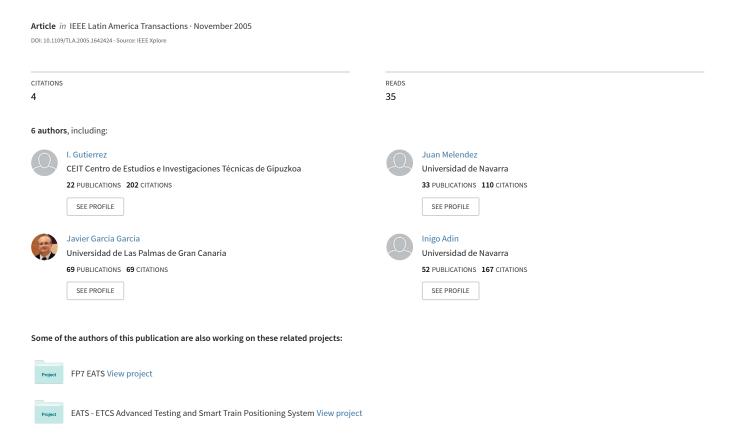
## Reliability Verification in a Measurement System of Integrated Varactors for RF Applications



# Verificación de la Fiabilidad de un Sistema de Caracterización de Varactores Integrados para Aplicaciones de Radiofrecuencia

I. Gutiérrez\*, J. Meléndez\*\*, *Member, IEEE*, J. García\*\*\*, I. Adín\*\*, G. Bistué\*\*, *Member, IEEE*, J. De Nó\*\*, *Member, IEEE* 

\*Tecnun (Universidad de Navarra) CEIT&Tecnun (Universidad de Navarra).

\*\*Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA)&Depto. Ing. Electrónica y Automática.ULPGC.

Abstract—En este artículo se presenta la verificación de un sistema de caracterización de componentes pasivos particularizado para el caso de varactores integrados. En primer lugar se muestra el sistema de caracterización utilizado, con el que se pueden obtener los parámetros S del varactor. A partir de dichos parámetros S se obtienen las figuras de mérito más representativas, como son el factor de calidad y el rango de sintonización. Debido que todo sistema de caracterización puede introducir incertidumbres en la medida, se hace necesario elaborar una serie de ensayos que permitan evaluar dicha incertidumbre. En este artículo se definen los ensayos a realizar y se comprueba la fiabilidad del sistema diseñado.

Index Terms—Sistema de caracterización, Parámetros S, Varactor integrado, Fiabilidad, Radiofrecuencia.

#### I. INTRODUCCIÓN

Acausa de la proliferación de los sistemas móviles de comunicación, la industria de la integración de circuitos en silicio ha experimentado grandes avances en los últimos años. En particular, la implementación de componentes pasivos integrados de alta calidad, es actualmente uno de los puntos clave para la mejora de dichos circuitos. Junto con los inductores, los varactores integrados son los componentes pasivos más utilizados [1], [2], siendo dispositivos en los que al cambiar la tensión de polarización entre sus extremos, varía la capacidad de los mismos [3].

Uno de los puntos clave para la correcta implementación de varactores integrados es diseñar un sistema de caracterización que permita obtener los resultados de las medidas de una forma repetible. Además, y debido a la incertidumbre introducida por los equipos de medida, es necesario realizar un conjunto de ensayos que permitan verificar la fiabilidad del sistema de caracterización propuesto.

En la sección II se presenta el sistema caracterizado diseñado, tanto los equipos utilizados como las estructuras de medida que unen el dispositivo con dichos equipos de medida. En la sección III se muestra el conjunto de ensayos que se han implementado para la verificación del sistema de caracterización. Por último, en la sección IV se presentan las conclusiones del artículo.

#### II. DISEÑO DEL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN

En función del tipo de medidas de los varactores integrados sobre oblea a realizar, se han de elegir los elementos del sistema de medida a utilizar. En este caso, los varactores son integrados para aplicaciones en el campo de la radiofrecuencia, por lo que el sistema de medida ha de permitir la caracterización sobre oblea en frecuencias entre 0,5 GHz y 10 GHz, para de esta forma incluir los estándares de GSM, GPRS, UMTS, Bluetooth, WLAN, etc. Por lo tanto, se introduce en la medida cierto nivel de incertidumbre que ha de ser tomado en cuenta durante el proceso de medición.

Para poder realizar dichas medidas es necesaria la utilización de unas estructuras de medida que permitan la conexión física entre el sistema de medida y el componente [4]. Dichas estructuras de medida también introducen variaciones en la medida del varactor, por lo que es fundamental un análisis de las mismas para poder eliminar su influencia.

#### A. Sistema de Medida

El sistema de medida es el conjunto de aparatos, cables, conectores y puntas de medida utilizados en la caracterización de un componente, en este caso de un varactor integrado. Dicho sistema de medida ha de ser elegido a partir de la técnica de medida utilizada. En este caso y debido que la impedancia de los varactores diseñados oscila en el rango entre 0,5  $\Omega$  y 20  $\Omega$  aproximadamente y el rango de trabajo entre los 500 MHz y los 10 GHz, se ha optado por un analizador de redes para la realización de las medidas [5]. Se ha utilizado el analizador de redes HP 8719 ES ya que su rango de trabajo está entre los 50 MHz y los 13,5 GHz.

Las puntas de medida sirven como adaptadores entre los cables medida y los *pads* de la estructura de medida. Se han usado las más habituales en las medidas de radiofrecuencia, las *Air Coplanar Probes (ACP)* de *Cascade Microtech* [6].

En la Fig. 1 se presenta el sistema de medida utilizado para la caracterización de varactores integrados, para así obtener los parámetros S de los mismos.

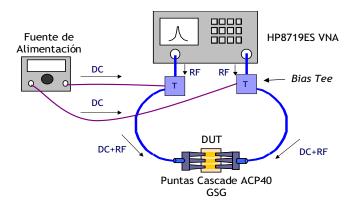


Fig. 1. Sistema de medida utilizado para la caracterización de varactores integrados.

Para asegurar que las medidas son fiables, el plano de referencia del sistema de medida se fija lo más cercano posible al elemento a medir, es decir, en el extremo de las puntas de medida. Situar el plano de referencia en el punto deseado se conoce como calibración del sistema. Existen muchos métodos de calibración [7], con ciertas ventajas y desventajas, optándose por usar la calibración *Short-Open-Load-Thru (SOLT)* [8]. Existen otros métodos de calibración como el LRM o el LRRM [9] que podrían ser considerados como válidos, pero se opta por el SOLT ya que este no depende de la tecnología, por lo que es un método más general.

#### B. Estructuras de Medida

Debido a que las medidas de los varactores se realizan sobre oblea, ya que dichos componentes están integrados, se diseñan y fabrican unas estructuras que permiten la interconexión entre las puntas de medida y los varactores integrados. Dichas estructuras se denominan estructuras de medida. La importancia de dichas estructuras reside en la necesidad de que el contacto entre el sistema de medida y los varactores permita la caracterización de los mismos, y que a su vez introduzca la menor influencia de los efectos parásitos.

Las estructuras de medida están preparadas para medir los varactores en dos puertos y cada puerto será del tipo GSG (tierra-señal-tierra). En la Fig. 2 se muestra una microfotografía de un varactor integrado con su correspondiente estructura de medida.

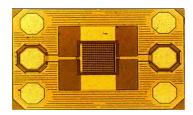


Fig. 2. Microfotografía de un varactor integrado con su estructura de medida.

#### C. De-embeding de las Estructuras de Medida

Una vez definidas las estructuras de medida se pasa a explicar cada uno de los efectos parásitos que introducen para, de esta forma, elaborar un sistema de *de-embeding* eficiente.

En la Fig. 3 se presenta el modelo equivalente de cada uno de los efectos parásitos introducidos por las estructuras de medida. Si los puertos de medida se separan más de 400μm se pueden despreciar las pérdidas de acoplamiento [10].

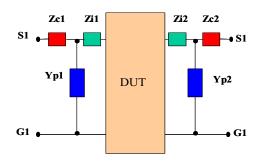


Fig. 3. Modelo de impedancias de una estructura de medida.

La resistencia de contacto ( $Z_c$ ) representa las pérdidas óhmicas que se producen debido al contacto entre las puntas y la estructura de medida junto con las pérdidas producidas en el pad. Al tener las estructuras de medida un diseño de dos puertos existirá resistencia de contacto en ambos puertos ( $Z_{C1}$  y  $Z_{C2}$ ).

Debido a que los *pads* están diseñados con capas de polisilicio y capas metálicas, aparecen entre los *pads* y tierra unas capacidades parásitas, por lo que se producen unas pérdidas debido a este autoacoplamiento. Dicho autoacoplamiento se dará en ambos puertos  $(Y_{p1} e Y_{p2})$ .

Para conectar los *pads* de señal con el dispositivo a medir se utilizan pistas metálicas por las que circularía la señal. Dichas pistas de conexión generan unas perdidas óhmicas en ambos puertos ( $Z_{i1}$  y  $Z_{i2}$ ).

El objetivo de utilizar técnicas de *de-embeding* sobre el dispositivo a caracterizar es trasladar el plano de referencia de la medida desde los *pads* de la estructura hasta el dispositivo.

Se han diseñado tres estructuras para la realización del *deembeding*: estructura *single-open*, estructura *single-short* y estructura *thru*.

En la Fig. 4 se muestra una microfotografía de la estructura *single-open* Dicha estructura se diseña conectando el *pad* de señal de ambos puertos con los de tierra. De esta forma la señal quedaría cortocircuitada a tierra en cada uno de los puertos de medida.

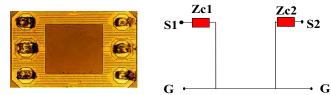


Fig. 4. Microfotografía y modelo de la estructura single-short.

El objetivo de esta estructura es medir la impedancia de contacto  $Z_{C1}$  y  $Z_{C2}$ . Al estar cortocircuitado el *pad* de señal con los de tierra, el único valor de impedancia que se obtiene es el de la resistencia de contacto.

La estructura *single-open* se diseña manteniendo aislados los *pads* de señal respecto a los de tierra en ambos puertos de media. En la Fig. 5 se muestra este tipo de estructuras.

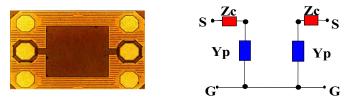


Fig. 5. Microfotografía y modelo de la estructura single-open.

Dicha estructura es utilizada para poder determinar el valor del autoacoplamiento de cada puerto (Y<sub>p1</sub> e Y<sub>p2</sub>). El modelo de impedancias de la medida de esta estructura incluye, además de los valores de autoacoplamiento, los valores de las resistencias de contacto del puerto uno y dos.

La estructura *thru* se diseña conectando los pads de señal de ambos puertos mediante un metal de tamaño igual al utilizado para conectar los *pads* con los varactores. En la Fig. 6 se presenta este tipo de estructuras.

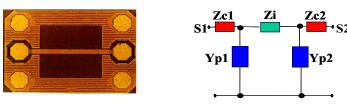


Fig. 6. Microfotografía y modelo de la estructura thru.

La medida de dicha estructura incluye además del valor de la resistencia de la línea de conexión  $(Z_i)$ , los valores de la resistencia de contacto y del autoacoplamiento. Por lo tanto habrá que eliminar dichas impedancias del modelo de la estructura thru.

El proceso de *de-embeding* que se sigue comienza con la resta de la estructura *single-short* a la estructura *thru* y de esta forma se elimina el valor de  $Z_c$ . A continuación se hace lo mismo con la estructura *single-open* por lo que se elimina el valor de  $Y_p$ . De este modo el modelo quedaría únicamente con el valor de la impedancia de las líneas de conexión  $Z_i$ . Mediante este proceso se calcula el valor de impedancia de una línea de conexión que una los *pads* de señal de una estructura de medida de dos puertos. Como el tamaño de las líneas de conexión depende de cada varactor, su impedancia se calcula a partir del dato de  $Z_i$  total afectado por un factor de corrección dependiente del tamaño de la conexión.

Una vez que se han realizado las medidas pertinentes, se utilizan las técnicas de *de-embeding* para la eliminación de los efectos parásitos que introducen las estructuras de medida. Una vez eliminados dichos efectos parásitos es posible la obtención a partir de los parámetros S de los parámetros que definen un varactor, como son el factor de calidad Q, el valor de la resistencia y el de la capacidad [11].En la Fig. 7 se muestra un resumen del proceso de *de-embeding* empleado.

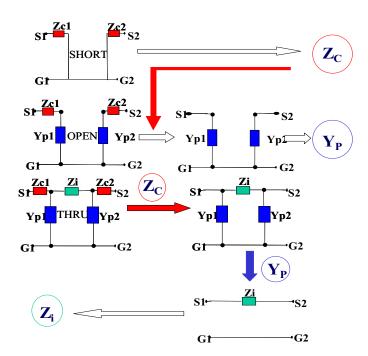


Fig. 7. Proceso completo de de-embeding.

#### III. VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN

Una vez definido el sistema de caracterización se han realizado una serie de ensayos para asegurar la fiabilidad del proceso de medida. Se ha trazado un plan de medidas que aporte datos para encontrar las causas de los efectos que se quieren mejorar, es decir, todas las medidas van orientadas, por una parte, a caracterizar la divergencia entre componente fabricado y modelo eléctrico proporcionado en la librería de componentes desarrollada, y por otra, a definir las situaciones en las que se producen las inestabilidades.

Se han identificado los puntos donde se pueden introducir divergencias entre el modelo eléctrico proporcionado por la librería de componentes y el comportamiento real de los mismos, los cuales se indican a continuación. Debido a que el error aumenta con la frecuencia, estos datos han sido tomados de las medidas cercanas a 10 GHz considerando así el caso más desfavorable.

#### A. Error Introducido por Posicionamiento de las Puntas de Medida Sobre el Componente a Medir

Los resultados de la caracterización de un componente dependen de la posición de las puntas de medida sobre el mismo. En el procedimiento que se emplea para medir, está definida la forma de posicionar las puntas sobre el componente. Sin embargo, debido a que el posicionamiento es manual existen pequeñas diferencias en el mismo, lo que introduce una incertidumbre en las medidas. Este ensayo busca caracterizar el error que se introduce.

Para realizar el ensayo, tras la calibración del sistema, se ha procedido a medir repetidamente una misma referencia de calibración de 50  $\Omega$  del substrato de calibración en un corto

espacio de tiempo. Las puntas de medida se han deslizado aproximadamente 60  $\mu m$  sobre la referencia de calibración. Se realiza una medida en el rango frecuencial que va desde 0,5 hasta 10 GHz, tomándose el valor de la medida a la frecuencia que determine mayor discrepancia con la referencia de 50  $\Omega.$  Se han realizado 40 medidas de dicha referencia. En la Fig. 8 se muestra la variación del valor de la impedancia en la referencia de calibración de 50  $\Omega.$  Este ensayo representa el error que se introduce por las tolerancias en el posicionamiento de las puntas.

#### Error relativo sobre una referencia de calibración de 50 $\Omega$

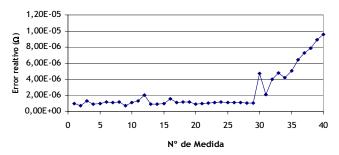


Fig. 8. Error introducido por el posicionamiento de las puntas de medida.

La Fig. 8 muestra cómo a partir de la medida 30 la calibración se pierde, por lo que los resultados han sido obtenidos a partir de las primeras 30 medidas. Tomando como referencia los 50  $\Omega$  de la referencia de calibración, el valor de la desviación estándar vendrá dado por:  $\sigma$ =5,6\*10<sup>-8</sup>.

#### B. Error Introducido por Tolerancias de la Referencia de Calibración

Antes de realizar la medida hay que realizar una calibración de los equipos de medida a utilizar. Dicha calibración consiste en variar la referencia de medida desde el aparato hasta el elemento a medir. Para realizar la calibración se utiliza un substrato de calibración en el que se pueden obtener medidas de valores fijos como pueden ser un *short* (cortocircuito) o un *load* (carga de 50  $\Omega$ ). Pero dichos valores tendrán unas dispersiones en el proceso de fabricación que harán que la referencia de calibración no sea exactamente la misma en cada proceso de calibración. Por lo tanto se introducirá un error que se debe analizar.

Para la realización de este ensayo se han tomado 10 referencias de calibración de  $50~\Omega$  y se han seguido los siguientes pasos:

- Calibración del sistema de medidas con una referencia de calibración.
- 5 medidas del S<sub>11</sub> de cada una de las 10 referencias de calibración a priori idénticas de la empleada para calibrar el sistema
- Cálculo de la media y desviación estándar de dichas medidas.

De esta forma de realizan 50 medidas que son suficientes para validar el proceso.

Los errores introducidos por las medidas se representan en la Fig. 9.

#### Tolerancias de las referencias de calibración



Fig. 9. Error introducido las tolerancias del proceso de fabricación.

Tomando como referencia los 50  $\Omega$  de las referencias de calibración utilizadas en este ensayo se obtiene un valor de la desviación estándar de  $\sigma = 54,8*10^{-4}$ .

### C. Error introducido por Inestabilidades en los Equipos de Medida

Los equipos de medida muestran diferentes resultados de diferentes medidas del mismo componente, debido principalmente a que al calentarse los equipos, estos varían sus características.

En este ensayo se ha buscado recoger el error que introducen los equipos en las distintas medidas por el calentamiento con el paso del tiempo. El procedimiento para realizar el ensayo se describe a continuación:

- Calibrar el sistema de medida.
- Posicionar las puntas sobre una referencia de calibración de 50 Ω.
- Repetir la medida sin levantar las puntas cada 10 minutos. Los resultados de los valores de  $Z_{11}$  de las medidas realizadas en este ensayo se muestran en la Fig. 10.

#### Influencia del calentamiento de los equipos sobre

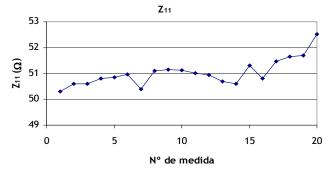


Fig. 10. Error introducido las inestabilidades de los equipos de medida.

Al referenciar a 50  $\Omega$  el valor que se obtiene de la desviación estándar es  $\sigma = 1.34*10^{-4}$ .

#### D. Error Introducido por Desgaste de los Componentes

Para una completa caracterización de un componente es necesario realizar diferentes medidas de cada uno de los mismos por lo que el componente se irá degradando hasta su inutilización. Los *pads* presentan una capa de óxido superficial. Al deslizar sobre ellos las puntas, la eliminan. En mediciones sucesivas arrancan también parte de las capas metálicas. Por ello las primeras medidas se ven afectadas por el óxido y las últimas pueden serlo si se ha arrancado metal.

De esta forma es necesario conocer cómo afecta el número de medidas en el resultado final. El proceso seguido en la realización del estudio del desgaste del componente es el siguiente:

- Realización de un número de medidas de una estructura Short hasta que se observe la degradación del componente.
- Calcular la media del valor de  $Z_{11}$  (real) con la frecuencia.
- Agrupar cada uno de los valores medios anteriores y calcular su media y desviación estándar.
- Eliminar las primeras medidas (oxidación) y las últimas (degradación) y recalcular la media y desviación estándar.

Los valores medios de  $Z_{11}$  (real) de las medidas con el número de las mismas se muestran en la Fig. 11.

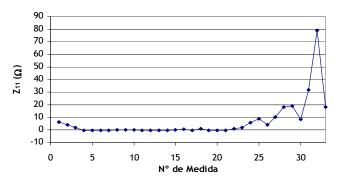


Fig. 11. Error introducido las inestabilidades de los equipos de medida.

En este proceso se observa que existen inicialmente unas medidas donde la resistencia de contacto es mayor, luego disminuye y se hace estable para posteriormente aumentar mucho como consecuencia de la degradación del *pad*. Por tanto, para ver la resistencia que se introduce en las medidas normales se eliminarán los valores de los extremos.

Al eliminar los valores de las medidas afectados por la pasivación y degradación se obtiene la Fig. 12.

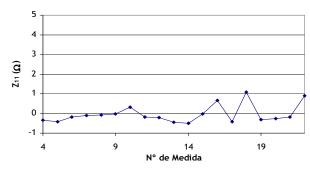


Fig. 12. Medidas válidas de un componente.

Al tomar como referencia los valores de medida de un varactor, se obtiene que la desviación estándar tiene un valor de  $\sigma = 12*10^{-4}$ .

#### E. Tolerancias del Proceso de Fabricación

Las tolerancias del proceso de fabricación no pueden obtenerse sobre distintos componentes fabricados. Esto se debe a que se carece de una muestra significativa, y a la falta de información sobre el lugar que ocuparon en la oblea durante el proceso de fabricación y sobre el lote de fabricación al que pertenecen. Para estimar la tolerancia del proceso de fabricación se sigue el siguiente proceso:

- Se parte de la relación entre los parámetros constructivos (geometría y parámetros del proceso de fabricación) con los valores que toman las variables del modelo eléctrico.
- Se tomarán los parámetros geométricos de una muestra de componentes y los del proceso de fabricación típicos y se hallará la respuesta de cada componente según el modelo.
- Se introducirán en el modelo los parámetros con las tolerancias más desfavorables tanto en la geometría como los indicados como máximo y mínimo del proceso de fabricación.
- Se estima la sigma de la distribución del proceso de fabricación al tomar un sexto del valor entre el máximo y el mínimo de la impedancia del componente para cada componente (el 95% de los valores están contenidos entre esas dos cotas según el fabricante).
- Se halla la media de las desviaciones estándar para la muestra estudiada.

Al introducir estas tolerancias del proceso de fabricación en el modelo podemos obtener la variación del parámetro  $Z_{11}$  en relación a dichas tolerancias. La desviación estándar media de estos resultados, al ser referenciados a la medida de un varactor, tiene un valor de  $\sigma = 2,57*10^{-2}$ .

#### IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Una vez halladas las desviaciones estándar de todos los ensayos y, por tanto, identificadas y evaluadas las fuentes de error, se procede a realizar una identificación de las más importantes. El resultado se muestra en la Tabla I.

TABLA I DESVIACIONES TÍPICAS DE LAS MEDIDAS

Tipo de Error	Desviación estándar (Ω)	Relativo frente a total
Posicionamiento de puntas	5,6·10 <sup>-8</sup>	<0,1%
Referencias de calibración	5,48·10 <sup>-3</sup>	<0,1%
Calentamiento de equipos	1,34·10 <sup>-4</sup>	0,5%
Desgaste del componente	1,2·10 <sup>-3</sup>	4,4%
Proceso de fabricación	2,57·10 <sup>-2</sup>	95%

Los errores más importantes que se introducen son los causados por el proceso de fabricación y por el desgaste del componente, en especial por el primero. Como se puede observar, el mayor error sobre el que se tiene control es introducido por el desgaste de los componentes. Para minimizar dicho error, hay que tener en cuenta el número de

veces que se ha medido un componente, de esta forma se ha de cambiar de chip cuando se considere elevado el número de medidas realizadas sobre el mismo. Debido a que no se posee ninguna influencia sobre el proceso de fabricación de los componentes, el sistema de caracterización se considera fiable, ya que los errores que introduce quedan enmascarados por la tolerancia de fabricación.

Las conclusiones más relevantes son:

- Se han adaptado las técnicas de de-embedding existentes en la bibliografía para el caso particular de varactores integrados.
- Se ha realizado un sistema de caracterización de varactores integrados que permite obtener los datos de las medidas de una forma fiable, ya que su error es cincuenta veces inferior a los introducidos por las desviaciones del proceso de fabricación.

#### V. REFERENCIAS

- J. Maget, "Varactors and Inductors for Integrated RF Circuits in Standard MOS Technologies", Tesis Doctoral, Munich, Diciembre 2002.
- [2] P. Andreani, S. Mattison, "A 1.8 GHz CMOS VCO tuned by accumulation-mode MOS varactor", Dept. of Applied Electronics, Lund University, Sweden, 1999.
- [3] A. S. Porret, T. Melly and C. Enz, "Design of High Q Varactors for Low-Power Wireless Applications Using a Standard CMOS Process", *IEEE Journal of Solid State Circuits*, vol. 35, n°. 3, pp 337-345, Marzo 2000.
- [4] E. Pedersen, "RF CMOS Varactors for Wireless Applications", Tesis Doctoral, Aalborg (Dinamarca), Febrero 2001.
- [5] G. Amorese, "Component Measurement Seminar", Agilent Technologies, París, 24 Septiembre, 2000.
- [6] Product Quick Guide ACP40-GSG, Cascade Microtech, Octubre 1999.
- [7] A. Lord, Microtech Training Session, "Introduction to On-Wafer RF Probing and Error Correction", Octubre 1999.
- [8] Technical Brief, "A Guide to Better Vector Network Analyzer Calibractions for Probe-Tip Measurements", Cascade Microtech, October 1999.
- [9] T. E. Kolding, "Course on RF On-Wafer Device Measuring Techniques", Aalborg University, Octubre 2000.
- [10] J. Aguilera, R. Berenguer, Design and Test of Integrated Inductors for RF Applications, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [11] E.Hernández, "Integración de un Corversor de Frecuencia para TV en Tecnología SiGe 0,8 µm", Tesis Doctoral, TECNUN, Diciembre 2002.

#### VI. BIOGRAFÍAS



Íñigo Gutiérrez está en posesión del título de Doctor Ingeniero Industrial desde Julio de 2004 por el trabajo de investigación "Varactores Integrados de Alto Factor de Calidad en Tecnología Estándar 0,8 µm SiGe para Aplicaciones en RF". Su labor de investigación se ha centrado en los últimos años en el diseño, caracterización y modelización de componentes pasivos para aplicaciones de RF.



Juan Meléndez. recibió el título de Ingeniero Industrial en la Universidad de Navarra en 1998. En Enero de 2002 finalizó la tesis doctoral titulada "Diseño de un Terminal de Conversión Directa a Baja Frecuencia Intermedia para GPS en Tecnología CMOS". Su labor de investigación se ha centrado en los últimos años en el diseño de PLLs para WLAN a 5 GHz.



Javier García obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería de Telecomunicación por la ULPGC, en 2001. Sus investigaciones se desarrollan dentro del Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA) de la ULPGC. Desde 2003 es Profesor Titular de Universidad en la ULPGC. Sus líneas de investigación de interés son el modelado, caracterización y diseño de dispositivos basados en heteroestructuras y de componentes pasivos integrados para aplicaciones en RF.



Iñigo Adin, Ingeniero Superior en Electrónica y Automática Industrial desde mayo del 2003, trabaja desde entonces como investigador en el CEIT (Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipúzcoa). Su campo de interés principal es el estudio, diseño e implementación de circuitos integrados CMOS para aplicaciones de WLAN en la banda de los 5GHz.



Guillermo Bistué recibió el grado de Doctor en 1996. Actualmente su campo de investigación está orientado hacia el diseño y fabricación de circuitos analógicos integrados para cabezales de radiofrecuencia de telefonía móvil. Hasta la fecha ha tomado parte en 10 proyectos industriales, siendo máximo responsable en dos de ellos. Es además autor o coautor de 20 artículos técnicos.



Joaquín de Nó compagina actualmente su labor investigadora con la subdirección de la Escuela de Ingenieros de San Sebastián, TECNUN, de la Universidad de Navarra. Recibió el grado de Doctor en 1996, después de haber trabajado en la aplicación de herramientas para la resolución de problemas eléctricos y electrónicos. Su labor investigadora se centra en la integración de dispositivos pasivos para aplicaciones de RF. Ha participado en 4 proyectos industriales y es autor y coautor de 6 artículos técnicos.