

# Caracterización de modelos no-lineales casi-estáticos a partir de las formas de onda en régimen de gran señal

Sergio Pérez Parras, Teresa M. Martín Guerrero, Janie D. Baños Polglase, Carlos Camacho Peñalosa

{sergio, teresa, jbanos, ccp}@ic.uma.es

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Málaga, Andalucía Tech, E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación, Bulevar Louis Pasteur 35, 29010 Málaga.

**Abstract-** A method to extract the conduction and displacement components of nonlinear quasi-static current sources controlled by two variables is concisely described. The method is numerically tested by means of two different analytical examples of nonlinear current sources. The obtained results clearly illustrate its performance as well as its potentiality in the nonlinear modelling of FET/HEMT devices.

## I. INTRODUCCIÓN

Una gran parte de los modelos circuitales de dispositivos semiconductores no-lineales emplean elementos no-lineales cuya respuesta es instantánea respecto a cambios en la variable o variables de control (elementos ‘casi-estáticos’). Esta hipótesis permite construir modelos no-lineales ‘compactos’ que proporcionan, en general, una simulación razonablemente buena del comportamiento no-lineal del dispositivo en la medida en que las frecuencias implicadas no estén próximas a la máxima frecuencia de funcionamiento del dispositivo.

Habitualmente se considera que la corriente en cualquiera de los puertos de los dispositivos es la superposición de dos componentes, una de conducción y otra de desplazamiento, por lo que los modelos intrínsecos involucran una fuente de corriente y una fuente de carga, respectivamente. La caracterización de ambas fuentes se puede realizar a partir de medidas en régimen de pequeña-señal (parámetros  $S$ ), referidas a los planos intrínsecos, y de su posterior integración para la obtención de las correspondientes funciones no-lineales. Sin embargo, esta integración plantea cierta problemática debido a las ligaduras que existen entre los elementos circuitales que se derivan de las fuentes no-lineales en régimen de pequeña señal.

Actualmente, la instrumentación disponible permite la medida de las formas de onda de las señales a frecuencias de microondas y milimétricas, lo que abre la posibilidad de caracterizar las fuentes no-lineales en régimen de gran señal. Este tipo de caracterización presenta la notable ventaja de llevar a cabo la caracterización en unas condiciones de trabajo próximas a las de utilización del dispositivo. Por el contrario, plantea el problema de separar la forma de onda correspondiente a la componente de conducción de la correspondiente a los fenómenos de desplazamiento a partir de la forma de onda de la corriente total.

En el caso de dispositivos de un puerto, las fuentes de corriente y de carga dependen de una única variable, lo que simplifica notablemente el problema de la separación. La idea básica consiste en inyectar una señal periódica de la

amplitud adecuada para barrer el intervalo deseado para la variable de control y medir la forma de onda de la respuesta. La frecuencia fundamental de la señal debe seleccionarse de manera que todos los armónicos relevantes de la respuesta estén dentro de la banda en la que el dispositivo se puede considerar casi-estático y debe tener un valor suficientemente elevado para que la componente de desplazamiento no sea despreciable frente a la de conducción. La extracción de estas componentes se puede llevar a cabo mediante formulaciones basadas, bien en el dominio del tiempo [1], bien en el dominio de la frecuencia [2]-[3]. Aunque ambas formulaciones permiten la caracterización de las fuentes de carga y de corriente, existe una diferencia importante entre ellas: las basadas en el dominio del tiempo proporcionan la característica C-V, mientras que la basada en el dominio de la frecuencia proporciona directamente la característica Q-V, evitando así la necesidad de integrar la característica C-V.

La separación de ambas componentes se complica significativamente en el caso de dispositivos con dos puertos, ya que ahora las fuentes están controladas por dos variables independientes. En este caso, las señales a inyectar deben ser casi-periódicas [4] con el fin de barrer una cierta región en el plano de las dos variables de control, lo que incrementa la complejidad de la instrumentación requerida. Dada la dificultad del problema, no es de extrañar que se hayan propuesto técnicas alternativas [5]-[8] que tratan de reducir esta caracterización bi-dimensional a una serie de caracterizaciones uni-dimensionales mediante la introducción de ciertas ligaduras. En consecuencia, estas técnicas tienen la ventaja adicional de requerir manejar señales periódicas exclusivamente.

No obstante, el problema fue abordado por Schreurs et al. [3], [9], mediante la extensión de la técnica de extracción en el dominio del tiempo al caso de dos variables de control, y más recientemente, por Niessen et al. [10], que han propuesto una técnica alternativa. Es importante señalar que la primera de las técnicas proporciona las capacidades incrementales, mientras que la segunda se basa en una linealización de la corriente, aunque finalmente proporciona las relaciones carga-tensiones.

En esta contribución se describen los aspectos básicos de una nueva técnica [11] basada en el dominio de la frecuencia que es una extensión al caso bi-dimensional de la propuesta en [2]-[3]. Su formulación es más simple que las de [3], [9], y [10] y proporciona directamente las relaciones carga-tensiones. Con el fin de validar la técnica e ilustrar sus prestaciones, se presentan los resultados de la extracción de

las componentes de conducción y de desplazamiento a partir de las formas de onda simuladas mediante dos modelos de dispositivos de complejidad creciente.

## II. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN

Bajo la hipótesis de que la corriente total en un puerto es la superposición de las componentes de conducción y desplazamiento, se tiene

$$i^T(t) = i[v_1(t), v_2(t)] + \frac{dq[v_1(t), v_2(t)]}{dt}. \quad (1)$$

Si las tensiones  $v_1(t)$  y  $v_2(t)$  son casi-periódicas, con idénticos periodos fundamentales,  $i^T(t)$  también lo es. El problema de la separación de componentes consiste en obtener  $i(v_1, v_2)$  y  $q(v_1, v_2)$  a partir de las formas de onda de  $i^T(t)$ . Para ello, basta con escribir la ecuación (1) en el dominio de la frecuencia, esto es, una ecuación para cada componente espectral, y tener en cuenta que, debido a la naturaleza casi-estática de las características no-lineales, sólo hace falta conocer la mitad de las componentes espectrales de cada característica lineal. De esta manera, la ecuación (1) en el dominio de la frecuencia proporciona el número de ecuaciones necesarias para poder determinar los espectros de la corriente de conducción y de la carga. Resulta inmediato, a partir de estas componentes espectrales, obtener, mediante una representación en función de  $v_1$  y  $v_2$ , con  $t$  como parámetro, las características no lineales deseadas.

## III. VALIDACIÓN NUMÉRICA DEL MÉTODO

Hasta la fecha, y a la espera de disponer de las medidas necesarias sobre un dispositivo real, la técnica de extracción se ha validado mediante dos ejemplos numéricos de complejidad creciente.

### A. Modelo numérico de corriente de conducción y de desplazamiento

En una primera fase se ha aplicado el método a una característica no-lineal compuesta por una fuente de corriente y una fuente de carga, controladas por dos tensiones y definidas ambas mediante polinomios de segundo grado [11]. Las variables de control han sido señales sinusoidales con frecuencias fundamentales casi-inconmensurables. De esta manera es posible calcular analíticamente los espectros completos de todas las señales involucradas, e incluir en el análisis todas las componentes espectrales, con lo que se evitan los errores asociados a la truncación de los espectros. Los resultados obtenidos mediante la aplicación estrictamente numérica del método de extracción han permitido constatar su viabilidad y precisión [11].

### B. Modelo de transistor de GaN

En una segunda fase, y con el fin de evaluar el comportamiento de la técnica de extracción en unas condiciones más próximas a la realidad, la técnica de extracción se ha empleado para extraer las características no-lineales en la rama de drenador de un modelo no-lineal de transistor de GaN [12]. En este caso, el número de

componentes espectrales ya no es finito y, por tanto, los resultados incorporan el efecto de la truncación de los espectros.

La topología del modelo casi-estático intrínseco de transistor de GaN es la representada en la Fig. 1. La descripción de las características no-lineales de drenador se encuentran en [12].

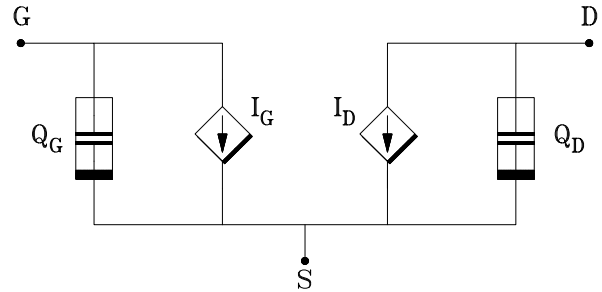


Fig. 1. Modelo casi-estático intrínseco genérico de FET/HEMT en configuración fuente común.

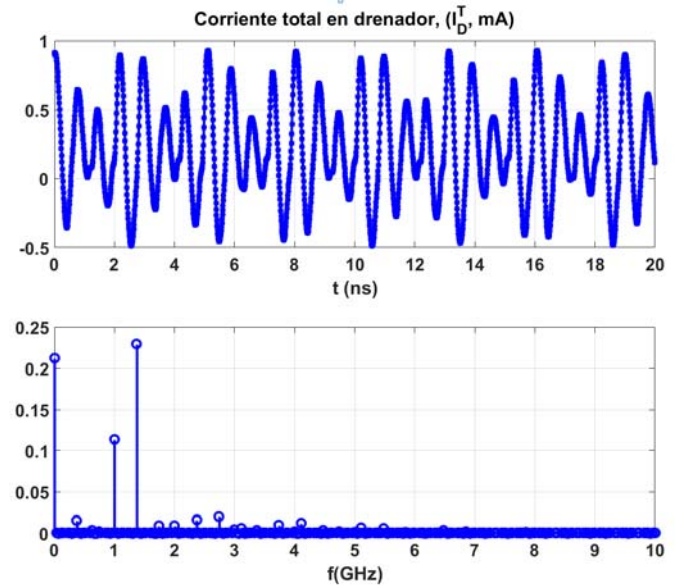
La elección de las amplitudes de las variables de control y de sus correspondientes componentes continuas está condicionada por la región en el plano  $v_G - v_D$  que se desea caracterizar (región lineal y su transición a la región de saturación). Las correspondientes tensiones aplicadas han sido

$$v_G(t) = -3 + 4 \cos(2\pi f_G t) \quad v_D(t) = 10 + 9 \sin(2\pi f_D t), \quad (2)$$

siendo  $f_G = 1 \text{ GHz}$  y  $f_D = 1,37 \text{ GHz}$ .

La forma de onda de la corriente total de drenador  $i_D^T(t)$  se ha obtenido sustituyendo los valores proporcionados por las ecuaciones (2) en la expresión para la corriente de drenador. En la Fig. 2 se ha representado esta forma de onda junto con su correspondiente espectro (hasta la máxima frecuencia considerada en el método de extracción).

Fig. 2. Forma de onda y espectro de la corriente de drenador.



A partir de las formas de  $v_G(t)$ ,  $v_D(t)$  e  $i_D^T(t)$  se obtienen los espectros de  $i_D(t)$  y  $q_D(t)$  mediante un procedimiento similar al descrito en [2], [3], aunque modificado para incluir el caso de señales casi-periódicas [11]. Para ello es preciso encontrar un número suficiente de parejas de instantes de tiempo  $(t_1, t_2)$  que verifiquen que  $v_G(t_1) = v_G(t_2)$  y que  $v_D(t_1) = v_D(t_2)$ , lo que permite la obtención de las relaciones entre las partes par e impar de los correspondientes espectros de  $i_D(t)$  y  $q_D(t)$ . En las Figs. 3 y 4 se han representado las formas de onda y los espectros obtenidos.

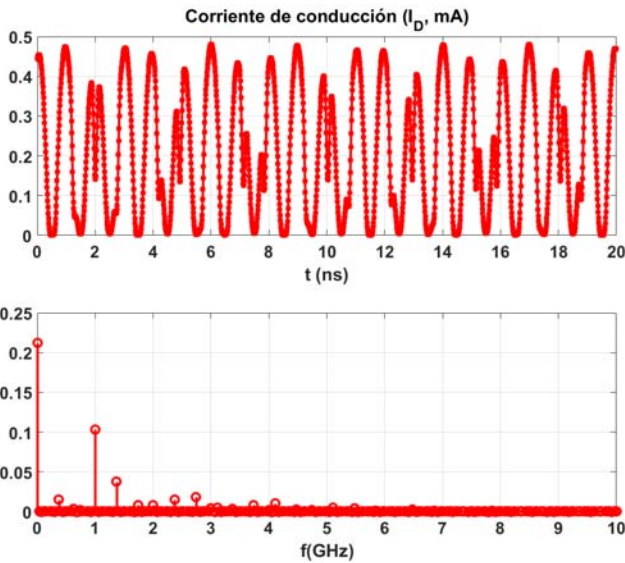


Fig. 3. Forma de onda y espectro de la corriente de conducción.

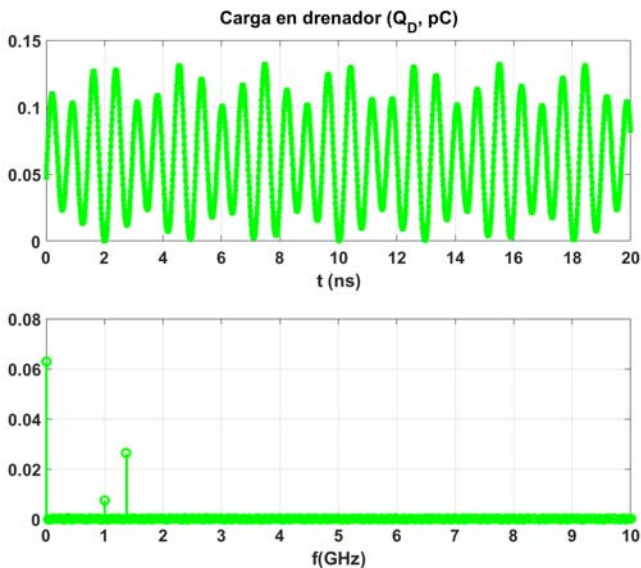


Fig. 4. Forma de onda y espectro de la carga.

La obtención de las correspondientes características no-lineales sólo requiere la representación paramétrica ( $t$ ) en función de  $v_G$  y  $v_D$ . Las características no-lineales así extraídas se muestran en las Figs. 5 y 6, donde además se han representado las superficies definidas por el modelo analítico

empleado para simular el dispositivo. En ellas se puede apreciar un acuerdo más que razonable entre ambas.

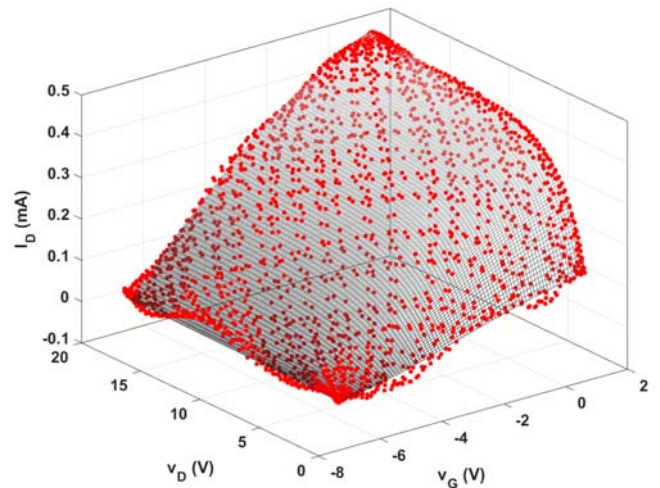


Fig. 5. Corriente de conducción: extraída (puntos rojos) y nominal (rejilla gris).

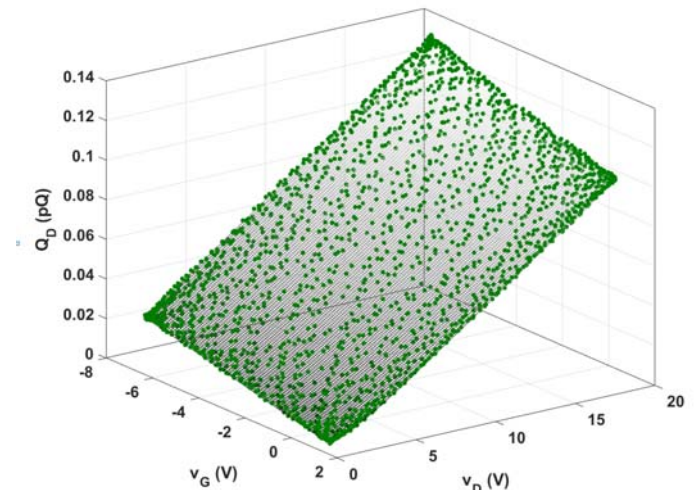


Fig. 6. Carga: extraída (puntos verdes) y nominal (rejilla gris).

Recuérdese que los espectros de las señales empleadas en la extracción están truncados, por lo que parece factible mejorar la obtención de las características no-lineales mediante una selección cuidadosa de las frecuencias fundamentales de las señales casi-periódicas empleadas y del criterio de truncación.

#### IV. CONCLUSIONES

En esta contribución se describe de forma somera un método de extracción de características no-lineales controladas por dos variables a partir de medidas en régimen de gran señal bajo excitación casi-periódica. La validación de este método se ha llevado a cabo mediante simulación numérica de las medidas en dos casos concretos. El primero de los casos, con solución analítica exacta, ha permitido comprobar la validez y la precisión del método. El segundo, más próximo a una situación real, ha permitido ilustrar su potencialidad en la caracterización de dispositivos FET/HEMT. No obstante, queda por analizar el comportamiento de la técnica de extracción cuando se

emplean medidas reales, en las que los errores e incertidumbres, así como los problemas derivados de la extracción de los elementos parásitos, podrían limitar la viabilidad de esta técnica de extracción. No menos interesante es la comparación de esta técnica con la recientemente propuesta por Niessen et al. [10]. Ambas actividades se encuentran actualmente en curso.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Andalucía por medio del proyecto TIC2012-1237.

#### REFERENCIAS

- [1] D. Schreurs, J. Verspecht, B.Nauwelaers, A. Barel and M. Van Rossum, "Comparison of Non-Linear Models Based on Linear and Non-Linear VNA Measurements," in *Proc. 4<sup>th</sup> INMMIC*, pp. 168-173, 1996.
- [2] T.M. Martín-Guerrero, C. Camacho Peñalosa, "Frequency domain-based extraction method of one-port device's non-linear state functions from large-signal measurements", in *Proc. 13<sup>th</sup> GAAS*, pp. 449-452, Paris (France), 3-4 October 2005.
- [3] T.M. Martín-Guerrero, J.D. Baños-Polglase, and C. Camacho-Peñalosa, "Frequency domain-based extraction method of quasi-static non-linear state functions from large-signal measurements," *International Journal of Microwave and Optical Technology*, vol. 1, pp. 90-99, Jun. 2006.
- [4] D. Schreurs, J. Verspecht, B.Nauwelaers, A. Van de Capelle, and M. Van Rossum, "Direct extraction of the non-linear model for two-port devices from vectorial non-linear network analyzer measurements," in *Proc. 27<sup>th</sup> Eur. Microw. Conf.*, pp. 921-926, 1997.
- [5] M.C. Currás-Francos, P.J. Tasker, M. Fernández-Barciela, S.S. O'Keefe, Y. Campos-Roca, E. Sánchez, "Direct extraction of nonlinear FET IV functions from time domain large signal measurements", *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 1993-1994, Oct. 1998.
- [6] M.C. Currás-Francos, P. J. Tasker, M. Fernández-Barciela, Y. Campos-Roca, E. Sánchez, "Direct extraction of nonlinear FET CV functions from time domain large signal measurements", *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 1789-1791, Oct. 1999.
- [7] M. C. Currás-Francos, P. J. Tasker, M. Fernández-Barciela, Y. Campos-Roca, E. Sánchez, " Direct extraction of nonlinear FET Q- V functions from time domain large signal measurements ", *IEEE Microw. Guided Wave Lett.* vol. 10, no. 12, pp. 531-533, Dec. 2000.
- [8] T.M. Martín-Guerrero, J.D. Baños-Polglase, C. Camacho-Peñalosa, M. Fernández-Barciela, D.G. Morgan, P.J. Tasker, "Frequency domain-based approach for nonlinear quasi-static FET model extraction from large-signal waveform measurements," *Proc. 1<sup>st</sup> EuMIC*, pp. 441-444, 2006.
- [9] D. Schreurs, "Non-linear device modelling and circuit design based on vectorial large-signal measurements," in *Proc. INMMIC*, pp. 28-42, 1998.
- [10] D. Niessen, G.P. Gibiino, R. Cignani, A. Santarelli, D.M.M.-P. Schreurs, and F. Filicori, "Charge-Controlled GaN FET Modeling by Displacement Current Integration from Frequency-Domain NVNA Measurements," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 64, pp. 4382-4393, Dec. 2016.
- [11] S. Pérez-Parras, T.M. Martín Guerrero, J.D. Baños-Polglase, C. Camacho-Peñalosa, "Frequency Domain-Based Method for Two-Port Nonlinear Quasi-Static Model Extraction from Large-Signal Waveforms", aceptado para su presentación en el 13<sup>th</sup> European Microwave Integrated Circuit conference, EuMIC 2018, Madrid, Spain, 24-25 Septiembre 2018.
- [12] S. Pérez-Parras, T.M. Martín Guerrero, J.D. Baños-Polglase, C. Camacho-Peñalosa, "Obtaining quasi-static models by a frequency domain extraction methodology", aceptado para su presentación en el International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMiC) 2018, Brive-La-Gaillarde, France, 5-6 Julio 2018.