

Optimización de la estimación de voltaje para simulaciones transitorias en detectores de potencia de radiofrecuencia a base de grafeno.

Leslie Paulina Cruz Rodríguez¹, Eloy Ramírez García¹, Aníbal Pacheco Sánchez²

¹ Instituto Politécnico Nacional, UPALM, Edif. Z-4 3er Piso, ESIME Zacatenco, Posgrado de Telecomunicaciones, Ciudad de México, México.

² Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores, Universidad de Granada, Granada, España.
lcruzr1400@alumno.ipn.mx, ramirezg@ipn.mx, a.pacheco@ugr.es

Resumen— Este trabajo presenta la metodología para obtener el voltaje de salida de un detector de potencia de radiofrecuencia considerando un análisis transitorio en un software de análisis circuital. El detector de potencia presentado se basa en el uso de un diodo Metal-Aislante-Grafeno (MIG) operando a 2.45 GHz. Se emplea el algoritmo de Newton-Raphson para reducir los tiempos de simulación.

Palabras Clave — Régimen transitorio, diodo metal-aislante-grafeno(MIG), detector de potencia.

Abstract- This work presents the methodology for obtaining the output voltage of an RF power detector by considering a transient analysis in a circuit analysis software. The presented power detector is based on the use of a Metal-Insulator-Graphene (MIG) diode operating at 2.45 GHz. The Newton-Raphson algorithm is employed to reduce simulation times. The results demonstrate that the presented methodology improves the convergence efficiency of transient simulations.

I. INTRODUCCIÓN

Los detectores de potencia son clave en sistemas de telecomunicaciones, ya que permiten medir y aprovechar la potencia de las señales de radiofrecuencia (RF) al ser transformadas a un voltaje de corriente directa (DC) mediante un proceso de rectificación. Un tipo común de detector de potencia utilizado en altas frecuencias es el detector de picos que utiliza la característica rectificante de los diodos para obtener una señal de salida proporcional a la amplitud de la entrada [1].

Los detectores de potencia a base de grafeno han sido implementados a 2.4 GHz, 30.8 GHz y 49.4 GHz [2] aprovechando las propiedades del grafeno, como su alta movilidad de portadores [3] y densidad de corriente que hacen al grafeno apto para trabajar a altas frecuencias [4]. Para aprovechar las propiedades de este material en un diodo, se ha implementado el diodo MIG (Metal-Aislante-Grafeno) para diferentes aplicaciones [5]-[8] en las que se encuentran los detectores de potencia. Para evaluar el comportamiento y proporcionar proyecciones de desempeño acertadas de

cualquier dispositivo electrónico es fundamental utilizar modelos compactos y herramientas de simulación de circuitos que permitan analizar su respuesta en diferentes condiciones de operación.

Uno de los enfoques que se utiliza para analizar circuitos electrónicos es el análisis transitorio; este análisis permite estudiar el comportamiento del voltaje y la corriente en el dominio del tiempo. Sin embargo, este método puede consumir recursos computacionales y tiempo considerable cuando se busca la solución en estado estacionario, lo que aumenta la dificultad de analizar el rendimiento de los circuitos. Se puede considerar como estado estacionario cuando la salida del circuito, ya sea voltaje o corriente, ya no varía significativamente en función del tiempo. La herramienta de diseño asistido por computadora utilizada en este trabajo obtiene las soluciones estacionarias de una simulación circuital a partir del algoritmo Newton-Raphson [9].

En este trabajo, se propone una estrategia para reducir el tiempo de simulación en el análisis transitorio de detectores de potencia basados en grafeno. En la sección II se presenta el modelo del diodo MIG utilizado en el detector de frecuencia, en la sección III se describe la implementación del detector de potencia, sus componentes y su principio de operación. La sección III presenta los resultados de la simulación, destacando la importancia de establecer un voltaje inicial en la salida para acelerar la convergencia al estado estacionario y, finalmente, se presentan las conclusiones.

II. DIODO METAL-AISLANTE-GRAFENO

La sección transversal del diodo MIG utilizado como referencia en este trabajo se presenta en la figura 1a donde se considera un cátodo de Ni, un ánodo de una aleación de Ti/Al, un dieléctrico de óxido de titanio TiO₂ de 6 nm de espesor y una capa de grafeno de 2 μm por 80 μm. El transporte del modelo relacionado a efectos de rectificación es vertical y se define por los efectos de barrera entre el Ni y el grafeno. El modelo compacto a gran señal de este diodo MIG se ha presentado con anterioridad en la literatura [10].

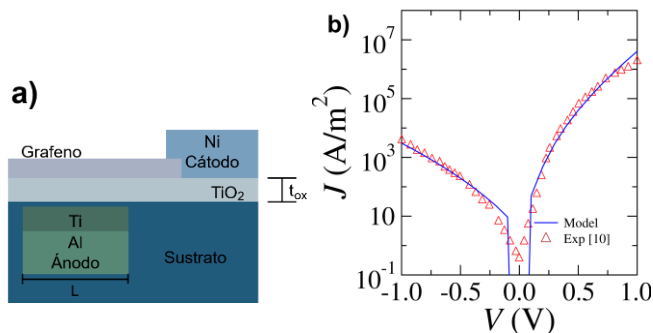


Figura 1.- a) Sección transversal del diodo MIG y b) Densidad de corriente contra voltaje aplicado. Marcadores: datos experimentales, línea: resultados de modelado [10].

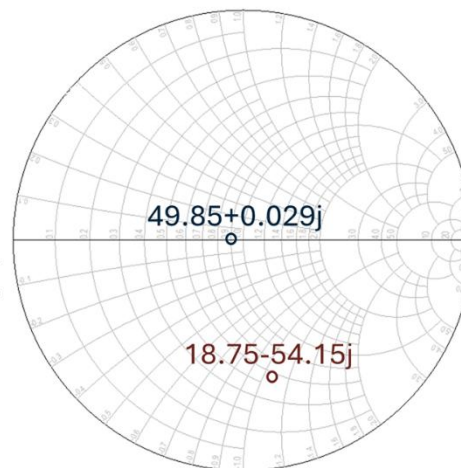


Figura 3.- Parámetro de reflexión directa. Círculo en azul (rojo) corresponde a la respuesta del diodo con (sin) circuito de acoplamiento.

El modelo compacto del diodo MIG se implementó en un programa de diseño tecnológico asistido por computadora (TCAD) para probar su funcionamiento, donde se aplica polarización de -1V a 1V para obtener la gráfica de densidad de corriente en función del voltaje como se observa en la figura 1b. En la figura 1b se observa que el modelo se ajusta a los valores experimentales presentados en [10].

III. DETECTOR DE POTENCIA

A. Metodología

El detector de potencia implementado se basa en el diodo Metal-Aislante-Grafeno (MIG) y opera a una frecuencia de 2.45 GHz [10]. El circuito que se desarrolló considera los elementos parásitos del diodo obtenidos mediante extracción de parámetros [10]. El detector de potencia de radiofrecuencia implementado en el TCAD se muestra en la figura 2a. En la parte central del circuito dentro del recuadro con líneas punteadas, se observan tanto el bloque correspondiente al modelo compacto intrínseco del diodo como los elementos extrínsecos. Las etapas del circuito que complementan el diseño del detector son las T de polarización, el acoplador de impedancia de entrada y el filtro pasabajas, cuyos circuitos se muestran en las figuras 2b, 2c y 2d, respectivamente.

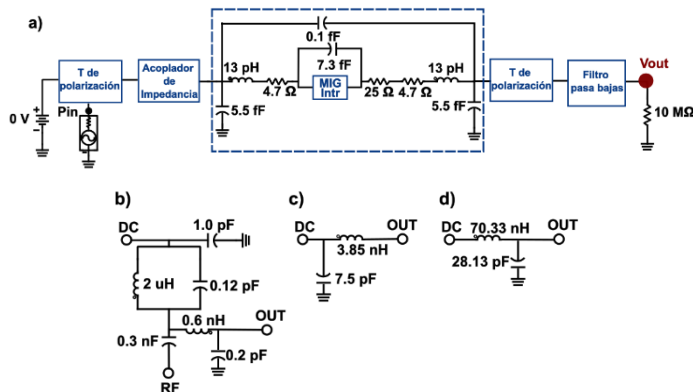


Figura 2.- Circuito utilizado para detectar potencia RF con un diodo MIG, b) T de polarización, c) acoplador de impedancia y d) filtro pasabajas.

El detector se implementó para poder obtener el voltaje en DC de salida, a partir de la señal RF a la entrada (P_{in}) para replicar las condiciones de medición en el laboratorio presentado en [11]. Para simular esto se utiliza a la salida una carga de 10 MΩ que representa la impedancia de entrada del multímetro con el que se mide el voltaje. El detector consta de las siguientes etapas:

a) T de polarización

La T de polarización (cf. Fig.2b) permite inyectar un voltaje de polarización sin que se filtre la señal de RF a la entrada de DC, y viceversa [12]. Este circuito se utiliza a la entrada del detector para combinar la señal de RF y DC para que el diodo pueda rectificar la señal y encontrar el voltaje asociado a la señal RF. A la salida del detector se utiliza para separar la señal de RF y DC para obtener el voltaje en DC.

b) Acoplador de impedancia

El acoplador de impedancia (cf. Fig. 2c) se emplea para adaptar la impedancia de dos medios para que no existan reflexiones y garantizar que toda la potencia posible de entrada llegue al diodo. Un buen acoplamiento se logra cuando los parámetros de dispersión S_{11} y S_{22} están por debajo de los -10dB o se encuentran en el centro de la carta de Smtih (caso acoplado). En la figura 3 se presenta la comparación que existe entre el detector de potencia acoplado (color azul) y desacoplado (color rojo) a la entrada.

c) Filtro

A la salida del detector de potencia se utiliza un filtro pasabajas (cf. Fig.2c) que ayuda a promediar la señal de entrada mejorando la estabilidad de la medición. El filtro está diseñado

a una frecuencia de corte de 160 MHz, inferior a la frecuencia de operación del detector (2.45 GHz).

d) Diodo a base de grafeno

Para este circuito se utilizó un diodo MIG representado por un modelo compacto de su parte intrínseca y elementos parásitos asociados a metalizaciones [10]. Los diodos MIG presentan una mayor no linealidad en comparación con otros diodos [10], lo que mejora su capacidad de convertir señales de radiofrecuencia en una componente de corriente continua.

B. Voltaje de referencia inicial

El TCAD encuentra la solución (estado estacionario) del circuito del detector de potencia utilizando el algoritmo Newton-Raphson que utiliza la ecuación (1):

$$V_{ref,n+1} = V_{ref,n} - \frac{f(V_{ref,n})}{f'(V_{ref,n+1})} \quad (1)$$

donde $V_{ref,n}$ es el valor inicial de referencia (iteración 0), $V_{ref,n+1}$ es el valor de la siguiente iteración y $f(V_{ref,n})$ es la función evaluada a dicho valor. En el caso del circuito del detector de potencia de radiofrecuencia a base del diodo MIG, la solución del circuito está dada por el voltaje DC de la salida V_{out} detectado, que es igual a $V_{ref,n}$ en la última iteración. Al tratarse de un circuito con múltiples elementos (tanto propios como externos del diodo) cuya respuesta depende del tiempo, la solución del circuito se dificulta si el valor de referencia (V_{ref}), difiere considerablemente con respecto a la solución buscada. Haciendo uso de la interfaz gráfica del TCAD, es posible indicar un voltaje de referencia al nodo de salida. El valor de V_{ref} debe considerar las siguientes condiciones generales:

- (i) Ser cercano al voltaje esperado en el estado estacionario, o en su defecto, ser de un valor cercano a la solución obtenida en alguna simulación anterior con condiciones similares, y
- (ii) Evitar valores aleatorios que generen transitorios prolongados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para probar el detector de potencia de la figura 2a se utiliza el programa “Advanced Desing System” (ADS) donde se emplea el análisis transitorio que permite definir parámetros como el tiempo de inicio y fin de la simulación y el mayor paso de tiempo. Se considera un tiempo final de 2 μ s. En la entrada se establece una potencia de 20 dBm para una frecuencia de 2.45 GHz. En la figura 4a se puede observar que la prueba en el tiempo de inicio establecido se obtiene una respuesta transitoria oscilatoria. Este tipo de respuesta no se considera correcta porque no se puede determinar un único valor de

voltaje a la salida debido a que se tienen varios valores de voltajes diferentes.

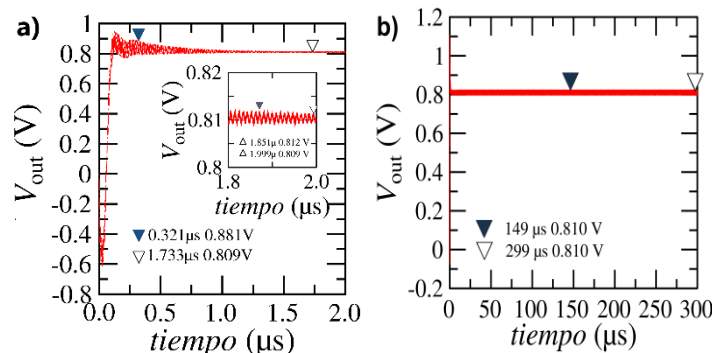


Figura 4.- Voltaje DC de salida en función del tiempo para una señal de RF de entrada con potencia de 20 dBm. (a) Respuesta transitoria fuera del estado estacionario. El recuadro muestra una ventana de tiempo específica de la misma gráfica. (b) Respuesta transitoria en estado estacionario.

Por lo anterior se busca que la salida del detector sea estable para determinar cuál es el valor real de voltaje a la salida como se muestra en la figura 4b, en donde se aumentó el tiempo de fin de simulación a 300 μ s. Con la ventana de tiempo de 300 μ s, se obtiene la respuesta estacionaria deseada. En la práctica, dicho valor corresponde al obtenido por el instrumento de medición de señales DC (multímetro u osciloscopio). Al disminuir la potencia a 10 dBm con el mismo tiempo de simulación (300 μ s) se obtuvo la gráfica de la figura 5a.

Estos resultados evidencian que, a menor potencia de entrada se requiere más tiempo de simulación para alcanzar el estado estacionario. Una posible solución es extender el tiempo de simulación, aunque esto aumenta el consumo de recursos computacionales. Como alternativa se implementa la técnica de asignación de voltaje de referencia inicial en la salida del circuito lo que le permite al TCAD no considerar todos los valores de voltaje iniciales y que la convergencia sea más rápida. Para lograr poner un voltaje inicial DC a la salida se emplea el bloque “InitCond” que fuerza el valor de voltaje al indicado en el nodo V_{out} de la figura 2. Este voltaje se utiliza para calcular el voltaje en el siguiente instante de tiempo en todo el circuito. El valor que se considera para el V_{ref} es el voltaje de salida obtenido en la primera simulación transitoria, y se actualiza manualmente con el valor de cada simulación (a distintos valores de P_m) hasta alcanzar el estado estacionario.

En la primera simulación, realizada a 300 μ s con una potencia de 10 dBm, cuya respuesta se muestra en la figura 5a, no se utilizó ningún voltaje de referencia inicial. A partir de esta simulación, se asignó el valor de voltaje obtenido (0.275 V). Como resultado, la nueva simulación produjo la respuesta mostrada en la figura 5b, donde se observa que el estado estacionario se alcanza en el mismo tiempo que en la figura 5a. Para aceptar un estado estacionario, se consideró cuando los

voltajes de salida medidos con dos marcadores fueran igual hasta la tercera cifra decimal.

El detector de potencia se simuló en un rango de potencias de entrada de -60 dBm a 20 dBm para una frecuencia de 2.45 GHz. Los resultados de simulación se compararon con otros presentados previamente en [10] así como datos experimentales reportados en [11]. En la figura 6 se puede observar que existe un mejor acuerdo entre los resultados de simulación presentado en este trabajo con los datos experimentales. Esto se logra al considerar un voltaje de referencia inicial adecuado para cada simulación y, en el estado estacionario entre los marcadores, considerando un valor cuya diferencia en los decimales sea mínima, manteniendo una separación de al menos 50 μ s. Obtener un detector de potencia capaz de medir con precisión la señal de entrada es fundamental para optimizar el diseño de circuitos de RF y realizar pruebas en diferentes condiciones de operación.

V. CONCLUSIONES

Se demostró que la asignación de un voltaje de referencia inicial adecuado en la salida del detector de potencia permite reducir significativamente el tiempo de simulación en análisis transitorios, al aprovechar el algoritmo de Newton-Raphson. Esto resulta especialmente útil cuando se trabaja con numerosos elementos como es el caso del diodo MIG que incorpora elementos extrínsecos y señales de baja potencia donde los tiempos de convergencia al estado estacionario pueden ser extensos. La asignación de un voltaje de referencia permitió conseguir una mejor convergencia del voltaje de salida para el detector de potencia de -60dBm a 20 dBm logrando ajustar la respuesta de salida a los datos experimentales.

REFERENCIAS

- [1] J. G. Ravanne, Y. L. Then, H. T. Su, I. Hijazin, "Microwave Power Detectors in Different CMOS Design Architectures: A Review," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 23, no. 6, pp. 76-84, Jun. 2022, doi: 10.1109/MMM.2022.3155033
- [2] M. Shaygan, Z. Wang, M. S. Elsayed, M. Otto, G. Iannaccone, A. H. Ghareeb, G. Fiori, R. Negra, and D. Neumaier, "High performance metal insulator graphene diodes for radio frequency power detection application," *Nanoscale*, vol. 9, no. 33, pp. 11944-11950, 2017. DOI: 10.1039/C7NR02793A
- [3] M. Saeed, P. Palacios, M.-D. Wei, E. Baskent, C.-Y. Fan, B. Uzlu, K.-T. Wang, A. Hemmetter, Z. Wang, D. Neumaier, M. C. Lemme, R. Negra, "Graphene-based microwave circuits: A review," *Advance Materials*, vol. 34, no. 48, Art. no. 2108473, Dec. 2022, doi: 10.1002/adma.202108473
- [4] G. C. Ghivela, J. Sengupta, "The Promise of Graphene: A Survey of Microwave Devices Based on Graphene," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 21, no. 2, pp. 48-65, Feb. 2020, doi: 10.1109/MMM.2019.2951967
- [5] M. Shaygan, Z. Wang, M. S. Elsayed, M. Otto, G. Iannaccone, A. H. Ghareeb, G. Fiori, R. Negra, D. Neumaier, "High performance metal-insulator-graphene diodes for radio frequency power detection application," *Nanoscale*, vol. 9, no. 33, pp. 11944-11950, 2017, doi: 10.1039/C7NR02793A
- [6] M. Saeed, A. Hamed, Z. Wang, M. Shaygan, D. Neumaier, R. Negra, "Graphene integrated circuits: new prospects towards receiver realisation," *Nanoscale*, vol. 10, no. 1, pp. 93-99, Jan. 2018, doi: 10.1039/c7nr06871a
- [7] C.-Y. Fan, M.-D. Wei, M. Saeed, A. Hamed, R. Negra, Z. Wang, M. Shaygan, D. Neumaier, "Large-Signal Metal-Insulator-Graphene Diode

- Model on a Flexible Substrate for Microwave Application," in Proc. *IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, Reykjavik, Iceland, Aug. 2018, doi: 10.1109/NEMO.2018.8503157
- [8] Z. Wang, B. Uzlu, M. Shaygan, M. Otto, M. Ribeiro, E. González Marín, G. Iannaccone, G. Fiori, M. S. Elsayed, R. Negra, D. Neumaier, "Flexible One-Dimensional Metal-Insulator-Graphene Diode," *ACS Applied Electronics Materials*, vol. 1, no. 6, pp. 945-950, Jun. 2019, doi: 10.1021/acsaelm.9b00122
 - [9] Transient and Convolution Simulation, Agilent Technologies, Septiembre 2011. Disponible en <https://edadownload.software.keysight.com/eedl/ads/2011/pdf/cktsimtra ns.pdf>
 - [10] F. Pasadas, M. Saeed, A. Hamed, Z. Wang, R. Negra, D. Neumaier, D. Jiménez, "Large-Signal Model of the Metal-Insulator-Graphene Diode Targeting RF Applications," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 40, no. 6, pp. 1005-1008, Jun. 2019, doi: 10.1109/LED.2019.2911116
 - [11] M. Saeed, A. Hamed, Z. Wang, M. Shaygan, D. Neumaier, and R. Negra, "Graphene integrated circuits: new prospects towards receiver realisation," *Nanoscale*, vol. 10, no. 1, pp. 93-99, 2018, doi: 10.1039/C7NR06871A
 - [12] Bahl, I., *Lumped Elements for RF and Microwave Circuits*, Artech House Microwave Library, 2003