



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

ZIENTZIA
ETA TEKNOLOGIA
FAKULTATEA
FACULTAD
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA



Gradu amaierako lana / Trabajo fin de grado
Fisikako eta Ingeniaritza Elektronikoko Gradu Bikoitza (Ingeniaritza Elektronikoa) /
Doble Grado en Física y en Ingeniería Electrónica (Ingeniería Electrónica)

Mejora de la eficiencia en el análisis de estabilidad basado en identificación polo-cero

Egilea/ Autor:
Gorka Belaunde Calzada

Zuzendaria/Director/a:
Aitziber Anakabe Iturriaga
Juan Mari Collantes Metola

Leioa, 2023ko Ekainaren 23a / Leioa, 23 de Junio de 2023

Índice

1. Introducción y objetivos	1
2. Análisis de estabilidad de circuitos de alta frecuencia mediante identificación polo-cero	2
2.1. Bases del análisis de estabilidad mediante identificación polo-cero	2
2.2. Algoritmo de identificación en el dominio frecuencial Vector Fitting	3
2.3. Estado del arte del análisis de la estabilidad mediante la identificación polo-cero	5
2.3.1. Selección del orden de la función de transferencia	5
2.3.2. Herramienta STAN	6
2.3.3. Identificación polo-cero mediante Vector Fitting en Matlab	7
3. Mejoras propuestas en el algoritmo automático de identificación de Vector Fitting	10
3.1. Polos iniciales colocados en las resonancias	12
3.2. Polos obtenidos mediante DACWIN empleados como polos iniciales	13
3.3. Aumento del incremento de orden a un valor fijo	16
3.4. Aumento del incremento de orden de manera adaptativa	19
3.4.1. Utilización del error de fase medio como parámetro adicional	21
3.4.2. Método con incremento adaptativo del orden propuesto	22
3.4.3. Ejemplo del método adaptativo para la respuesta GaN5	23
3.4.4. Aplicación del incremento de orden adaptativo para la respuesta GaN5 con diferentes tolerancias de fase	27
4. Validación exhaustiva del método propuesto con incremento de orden adaptativo	30
5. Conclusiones	38
6. Bibliografía	40

1. Introducción y objetivos

Las inestabilidades ocasionadas por la presencia de oscilaciones parásitas son un problema habitual en el diseño de circuitos de RF y microondas [1], [2]. Estas inestabilidades pueden impedir el correcto funcionamiento o incluso invalidar cualquier aplicación práctica de estos circuitos, por lo que detectarlas durante la fase de diseño mediante herramientas de simulación es crucial.

Hay diferentes métodos que permiten realizar el análisis de estabilidad de circuitos de RF y microondas [3]-[11], entre los que destaca la identificación polo-cero [11], por la sencillez de su aplicación y por su gran versatilidad. Además, la técnica de identificación polo-cero permite una interpretación intuitiva del análisis de estabilidad realizado, ya que se basa en las características del diagrama-polo cero de la función de transferencia del circuito linealizado en torno a su estado estacionario para detectar si este es estable o inestable. Si todos los polos de la función de transferencia están ubicados en el semiplano izquierdo del plano complejo, el estado estacionario del circuito analizado es estable; y en caso de que haya algún polo presente en el semiplano derecho del plano complejo, el estado estacionario del circuito analizado es inestable.

Para realizar el análisis del diagrama polo-cero, es necesario obtener la función de transferencia del circuito linealizado expresada como el cociente de dos polinomios. La técnica de identificación polo-cero logra este objetivo realizando un ajuste a partir de la respuesta en frecuencia del circuito linealizado, empleando métodos como Vector Fitting u optimización por mínimos cuadrados [12]. Más adelante se detalla el proceso de obtención de la respuesta en frecuencia del circuito linealizado, pero este trabajo se centra principalmente en el ajuste de esta respuesta en frecuencia a una función de transferencia racional mediante Vector Fitting.

La elección del orden de la función de transferencia es de vital importancia, ya que este es a priori desconocido, y de esta elección depende que la función de transferencia represente adecuadamente la dinámica del sistema y, por tanto, que el análisis de estabilidad realizado sea válido. Para ello, es necesario el desarrollo de algoritmos que seleccionen el orden de manera automática [13].

La identificación polo-cero automática mediante Vector Fitting selecciona un orden para la función de transferencia que representa adecuadamente la dinámica del sistema y permite realizar un análisis de la estabilidad robusto. Sin embargo, el proceso es lento a la hora de ajustar respuestas en frecuencia complejas con muchas resonancias. El objetivo de este trabajo es mejorar la eficiencia de la identificación polo-cero mediante Vector Fitting sin poner en compromiso la calidad de la identificación realizada.

Para conseguir este objetivo, se han creado varios algoritmos en Matlab [14] basados en el estado del arte de la identificación polo-cero automática mediante Vector Fitting para el análisis de la estabilidad [15]. En estos algoritmos se han implementado diferentes propuestas para mejorar la eficiencia de la identificación polo-cero mediante Vector Fitting, y se ha comprobado si son eficaces comparando los tiempos de identificación obtenidos con los del estado del arte existente para diferentes respuestas en frecuencia.

Se han analizado los resultados obtenidos y la aportación de las propuestas realizadas al análisis de estabilidad de circuitos de RF y microondas. Por último, se han analizado sus limitaciones y se han propuesto ideas para líneas futuras.

2. Análisis de estabilidad de circuitos de alta frecuencia mediante identificación polo-cero

En este apartado se establece el marco teórico del trabajo: el análisis de estabilidad de circuitos de RF y microondas empleando la técnica de identificación polo-cero [11] y el método de identificación Vector Fitting [16]-[18].

Por otro lado, se describe el estado del arte existente respecto a la técnica de identificación polo-cero.

2.1. Bases del análisis de estabilidad mediante identificación polo-cero

La técnica de identificación polo-cero permite estudiar la estabilidad de un circuito de alta frecuencia a través del análisis del diagrama-polo cero obtenido a partir de su respuesta en frecuencia.

El análisis de la estabilidad de un circuito mediante esta técnica se divide en tres pasos [19]:

- Obtener la respuesta en frecuencia de lazo cerrado del circuito linealizado en torno a su estado estacionario.
- Ajustar la respuesta en frecuencia a una función de transferencia expresada mediante el cociente de dos polinomios.
- Realizar un diagrama polo-cero de la función de transferencia y analizar la posición de los polos obtenidos en el plano complejo.

Mientras que los sistemas lineales tienen una única solución, los sistemas no lineales, como los circuitos de RF y microondas con cuyas respuestas se ha trabajado en este proyecto, presentan múltiples.

Para analizar la estabilidad local de una de esas soluciones se puede estudiar el efecto que pequeñas perturbaciones tienen sobre ella. Si la perturbación hace que el sistema se mueva de la solución, esta será inestable, y en caso de que el sistema se recupere tras la perturbación y vuelva a la solución inicial, esta será estable. Este método solo abarca el análisis de la estabilidad local asintótica y no se centra en la estabilidad global, que también depende del efecto de grandes perturbaciones sobre el sistema.

Es posible demostrar que las propiedades cualitativas del sistema no lineal alrededor de una determinada solución de equilibrio se pueden, por norma general, aproximar a través de la linealización del sistema en torno a la solución [20].

Por tanto, el punto de partida de la técnica de identificación polo-cero es un circuito linealizado respecto a su estado estacionario, que puede ser un punto de operación en continua o una solución periódica de gran señal.

La respuesta en frecuencia de lazo cerrado se puede conseguir conectando una fuente de corriente de pequeña señal en paralelo en un nodo del circuito o una fuente de voltaje de pequeña señal en serie en una rama del circuito. En ambos casos se varía de forma progresiva la frecuencia de la fuente para realizar un barrido de la banda de frecuencias que se vaya a analizar.

En el caso de la fuente de corriente, la señal de entrada es la corriente que se introduce en el nodo y la señal de salida es el voltaje que se genera en el nodo de conexión de la fuente de corriente; es decir, la respuesta en frecuencia es su impedancia. En el caso de la fuente de tensión, la entrada es el voltaje introducido y la salida la corriente que atraviesa la fuente, por lo que la respuesta en frecuencia es su admitancia.

En un sistema lineal (o linealizado), todas las respuestas en frecuencia de lazo cerrado comparten el mismo denominador; es decir, los mismos polos. Por tanto, debería ser posible medir la respuesta de lazo cerrado para cualquier nodo o rama del circuito y obtener toda la información necesaria para analizar la estabilidad del sistema, puesto que esta depende de la posición de los polos en el plano complejo.

Sin embargo, puede haber nodos/ramas del sistema que estén aislados eléctricamente de parte de la dinámica del circuito [15], [19]. Debido a esto, al medir la respuesta de lazo cerrado en esos nodos/ramas los polos que representan esa parte de la dinámica aparecen cancelados por ceros, si el aislamiento es total, o casi-cancelados, si el aislamiento es parcial. Esto puede ser muy problemático al no poder distinguir entre estas casi-cancelaciones, denominadas físicas, y las casi-cancelaciones numéricas, que se tratarán más adelante. A priori no puede saberse para qué casos se puede presentar este problema, por lo que se suelen analizar varios nodos/ramas del circuito.

En relación con esto último, se puede trabajar con respuestas en frecuencia Single-Input Single-Output (SISO), que incluyen la información de un solo nodo/rama del circuito, o con respuestas en frecuencia Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), que incluyen varios nodos/ramas del circuito.

Una vez obtenida la respuesta en frecuencia de lazo cerrado, el siguiente paso es ajustar esa respuesta a una función de transferencia racional, utilizando métodos como Vector Fitting u optimización por mínimos cuadrados de manera iterativa.

El orden de la función de transferencia es a priori desconocido [13], el objetivo es que la función de transferencia evite el under-modeling (cuando en la función de transferencia faltan polos críticos para el análisis de estabilidad) y el over-modeling (cuando el orden de la función de transferencia es demasiado alto), que puede dar lugar a casi-cancelaciones polo-cero numéricas que pueden confundirse con las casi-cancelaciones físicas.

Por último, se realiza un diagrama polo-cero de la función de transferencia y se analiza la posición de los polos obtenidos en el plano complejo. Si todos los polos se encuentran en el semiplano izquierdo (parte real negativa) el sistema es estable, pero si hay algún polo presente en el semiplano derecho (parte real positiva) el sistema es inestable.

Cabe destacar que, en comparación con otros métodos de análisis de la estabilidad [3]-[10], la técnica de identificación polo-cero no solo indica el número de polos inestables que presenta el sistema, sino también su localización exacta en el plano complejo [21].

2.2. Algoritmo de identificación en el dominio frecuencial Vector Fitting

Vector Fitting (VF) [16]-[18] es una técnica desarrollada por Bjørn Gustavsen y Adam Semlyen para realizar el ajuste de respuestas en el dominio de la frecuencia a funciones de transferencia racionales.

Se parte de la respuesta en frecuencia $f(jw)$ y de un conjunto de polos iniciales, introducido por el usuario de forma manual o mediante el uso de algoritmos que lo seleccionen de manera automática, y a partir de ellos se obtiene un conjunto mejorado de polos. Este proceso se puede realizar de manera iterativa, sustituyendo el conjunto de polos iniciales por el mejorado y repitiendo el proceso.

En primer lugar, se tiene la siguiente aproximación racional de orden N de la función de transferencia $f(s)$:

$$f(s) \approx \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d \quad (1)$$

El problema a resolver es obtener todos los coeficientes que aparecen en (1): los residuos c_n y los polos a_n , que pueden ser reales o parejas de complejos conjugados, y la ganancia directa de la función de transferencia d , que es real. Es un problema no lineal, ya que los polos a_n aparecen en el denominador, y VF lo resuelve como un problema lineal en dos pasos.

Se introducen dos funciones auxiliares $\sigma(s)$ y $p(s)$ definidas empleando el conjunto de polos iniciales introducido \bar{a}_n :

$$\sigma(s) \approx \sum_{n=1}^N \frac{\tilde{c}_n}{s - \bar{a}_n} + 1 \quad (2)$$

$$p(s) \approx \sum_{n=1}^N \frac{\hat{c}_n}{s - \bar{a}_n} + \hat{d} \quad (3)$$

Además, se impone la siguiente condición que relaciona las tres aproximaciones racionales:

$$\sigma(s)f(s) = p(s) \quad (4)$$

Esta ecuación sí es lineal, ya que en los denominadores de $\sigma(s)$ y $p(s)$ solo aparecen los polos \bar{a}_n ya conocidos, y se puede aplicar en diferentes puntos frecuenciales, dando lugar a un problema sobredeterminado que se puede resolver mediante el método de mínimos cuadrados. Así, es posible obtener las incógnitas \tilde{c}_n , \hat{c}_n y \hat{d} .

Las funciones $p(s)$ y $\sigma(s)$ se pueden expresar también como una fracción en vez de como suma de fracciones parciales de la siguiente forma:

$$p(s) = \frac{\prod_{n=1}^N (s - \hat{z}_n)}{\prod_{n=1}^N (s - \bar{a}_n)} \quad (5)$$

$$\sigma(s) = \frac{\prod_{n=1}^N (s - \tilde{z}_n)}{\prod_{n=1}^N (s - \bar{a}_n)} \quad (6)$$

En (5) y en (6) se han introducido los ceros de $p(s)$ y de $\sigma(s)$, \hat{z}_n y \tilde{z}_n respectivamente.

Combinando (4) con (5) y (6) se obtiene lo siguiente:

$$f(s) = \frac{p(s)}{\sigma(s)} = \frac{\prod_{n=1}^N (s - \hat{z}_n)}{\prod_{n=1}^N (s - \tilde{z}_n)} \quad (7)$$

Se puede observar que los polos de $f(s)$ (a_n) son los ceros de $\sigma(s)$ (\tilde{z}_n). Por tanto, el problema se reduce a calcular los ceros de $\sigma(s)$, y esto se puede hacer igualando la aproximación en funciones racionales de $\sigma(s)$ que se muestra en (2) a la forma racional que aparece en (6), ya que todo el resto de parámetros son conocidos.

Por último, los residuos c_n y la ganancia directa d se pueden calcular como un problema lineal sobredeterminado a partir de (1), ya que los polos a_n ya son conocidos.

Como se ha mencionado anteriormente, este proceso se puede realizar de manera iterativa, empleando ahora los polos a_n como el conjunto de polos iniciales, de esta manera se mejora el ajuste de la función de transferencia con cada iteración.

2.3. Estado del arte del análisis de la estabilidad mediante la identificación polo-cero

En este apartado se analiza el estado del arte del análisis de la estabilidad utilizando la técnica de identificación polo-cero, en particular se explica el funcionamiento de la herramienta STAN [22]. Se centra el análisis en la identificación polo-cero utilizando VF [16]-[18], pero también se explica brevemente la identificación polo-cero utilizando DAC-WIN (Divide-And-Conquer With Noise) [22].

2.3.1. Selección del orden de la función de transferencia

A la hora de aplicar la técnica de identificación polo-cero la selección del orden de la función de transferencia es de vital importancia, ya que este es a priori desconocido, y de esta elección depende que se evite tanto el under-modeling como el over-modeling [13].

En el primer caso el orden es demasiado bajo y se pierde parte de la dinámica del sistema, y en el segundo es demasiado alto y pueden aparecer cuasi-cancelaciones polo-cero que comprometen el análisis de estabilidad realizado.

Estas cuasi-cancelaciones, denominadas numéricas, pueden ser indistinguibles de las físicas, que sí representan un comportamiento real del sistema, mientras que las numéricas están causadas principalmente por el ajuste del ruido que acompaña a la respuesta en frecuencia debido al excesivo orden escogido. Esto es problemático cuando estas cuasi-cancelaciones se alojan en el semiplano derecho del plano complejo, ya que las cuasi-cancelaciones numéricas no tienen ninguna relevancia sobre la estabilidad del sistema.

En definitiva, si el under-modeling está presente en la identificación realizada, al perderse parte de la dinámica del sistema, es posible deducir de manera errónea que el sistema analizado es estable cuando en realidad es inestable. Por otro lado, si el over-modeling está presente, al aparecer polos y ceros que no representan la dinámica del sistema, es

posible deducir incorrectamente lo contrario; es decir, que el sistema es inestable cuando en realidad es estable.

Por tanto, es importante remarcar que la validez del análisis de estabilidad realizado se asienta sobre la correcta elección del orden de la función de transferencia.

La selección del orden de la función de transferencia de manera manual basándose únicamente en la inspección visual de la respuesta en frecuencia a analizar es muy limitado, y favorece la aparición de estos dos problemas.

Por tanto, para evitar los efectos adversos debidos al under-modeling y al over-modeling a la hora de realizar la identificación polo-cero, es necesario disponer de algoritmos que seleccionen el orden de manera automática [13].

En este contexto surge la herramienta STAN, que se trata a continuación, que permite realizar la identificación polo-cero mediante dos métodos de identificación diferentes y que permite realizar la selección del orden de manera automática.

2.3.2. Herramienta STAN

La herramienta STAN [22], creada por el Grupo de Investigación de Radiofrecuencia y Microondas del Departamento de Electricidad y Electrónica de la UPV/EHU en colaboración con el Centre National d'Études Spatiales (CNES) [23] y distribuida por AMCAD Engineering [24], es una herramienta que permite realizar el análisis de estabilidad de respuestas en frecuencia utilizando la técnica de identificación polo-cero mediante dos métodos: Vector Fitting y DACWIN.

En ambos casos se puede seleccionar el orden de la función de transferencia de manera manual o de manera automática. En caso de realizarse de manera automática, se emplea el error de fase (θ_{error}) entre la respuesta en frecuencia inicial y la función de transferencia obtenida como parámetro para evaluar la calidad de la identificación realizada.

Este error de fase se compara para con una tolerancia de fase ($\theta_{tolerancia}$) establecida por el usuario. Se parte de un orden y un conjunto de polos iniciales establecidos de manera automática, y a partir de ahí el orden de identificación se aumenta hasta que para un orden se cumpla que $\theta_{error} < \theta_{tolerancia}$.

Es importante mencionar que θ_{error} es el error de fase máximo de entre todos los puntos frecuenciales, para asegurar así que la identificación de la respuesta frecuencial se ha realizado correctamente en todos los puntos analizados.

La identificación mediante VF para cada orden se realiza como se explica en [16]-[18]. Al finalizar la identificación se muestra para cada polo un parámetro denominado factor ρ , que sirve para analizar si los polos situados en la mitad derecha del plano complejo son relevantes para la dinámica del sistema; es decir, si son físicos o numéricos [15].

El método DACWIN, por su parte, realiza la identificación dividiendo la banda de frecuencias en sub-bandas y cada una de ellas la ajusta mediante mínimos cuadrados [13]. Esta división se ejecuta de manera que las fronteras entre sub-bandas coincidan con los valles de la respuesta en frecuencia [25].

Al hacer esta división en sub-bandas no se garantiza la obtención de una función de transferencia y de un diagrama polo-cero que representen al sistema de manera completa, pero el análisis de estabilidad realizado a partir de esos resultados sí es adecuado.

En comparación con VF, resulta un método menos robusto pero también más rápido. VF es considerablemente más lento a la hora de analizar respuestas más complejas, y es ese aspecto el que se trata de mejorar en este trabajo: reducir el tiempo de identificación de VF sin poner en compromiso la calidad de la identificación realizada. Hay que tener en cuenta que esto solamente es aplicable cuando la selección del orden se realiza de manera automática.

Para reducir el tiempo de identificación utilizando VF es necesario modificar el algoritmo sobre el que está basada esta identificación en STAN, que es el realizado en MATLAB por Libe Mori como parte de su tesis doctoral [15]. En el siguiente apartado se explica en detalle cómo realiza este algoritmo la identificación polo-cero mediante VF.

2.3.3. Identificación polo-cero mediante Vector Fitting en Matlab

El algoritmo de identificación polo-cero utilizando VF que utiliza STAN es el realizado por L. Mori en MATLAB para su tesis doctoral [15]. Este algoritmo está compuesto por varios módulos, que se agrupan en torno al programa principal *MM_stab*.

En este trabajo se han estudiado únicamente las respuestas en frecuencia SISO (Single-Input Single-Output), que se identifican en el módulo *SISO2*, pero el programa también permite la identificación de respuestas MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).

A la hora de realizar la identificación de una respuesta, el módulo *SISO2* permite seleccionar el orden de manera manual o automática. Los problemas relacionados con tiempos de identificación largos para algunas respuestas solamente ocurren con la selección automática del orden, por lo que de ahora en adelante no se tratará más la selección manual.

El módulo *SISO2* incluye varios submódulos, más adelante se detallan los principales: *Count_slope*, que calcula el orden inicial con el que comienza la identificación de manera automática, *Calcinpoles*, que calcula el conjunto de polos iniciales para ese orden inicial, y *Vectfit3*, en el que está implementada la técnica de Vector Fitting [16]-[18].

Antes de explicar el procedimiento de identificación completo, es necesario entender cómo se escogen el orden y los polos iniciales.

En primer lugar, la selección del orden inicial se realiza en el módulo *Count_slope*. Para ello, se cuenta el número de cambios de pendiente presentes en el módulo de la respuesta en frecuencia para el rango de frecuencias analizadas. En estos cambios de pendiente están incluidas tanto las resonancias como los valles; es decir, el número total de cambios de pendiente es el doble del número de resonancias (r) que presenta la respuesta. Este es el orden inicial empleado por el algoritmo: el doble del número de resonancias ($2 \cdot r$). Para evitar que se produzca over-modeling en respuestas muy ruidosas, se cuentan solamente los cambios de pendiente separados entre ellos por al menos 5 puntos de frecuencia.

A continuación, los polos iniciales se calculan en el módulo *Calcinpoles*. Tal y como recomiendan Bjørn Gustavsen y Adam Semlyen en [16]-[18], se escogen parejas de polos complejos conjugados $\{p_{2n-1}^{inicial}, p_{2n}^{inicial}\}$ con partes imaginarias equiespaciadas de manera lineal a lo largo del rango de frecuencias (angulares) de la respuesta.

$$p_{2n-1}^{inicial} = (-0.01 - i) \cdot \beta_n, \quad p_{2n}^{inicial} = (-0.01 + i) \cdot \beta_n \quad n \in \{1, \dots, r\} \quad (8)$$

Por cada resonancia hay una pareja de polos complejos conjugados, por eso $n \in \{1, \dots, r\}$, pero eso no quiere decir que cada pareja esté asociada a una resonancia, las partes imaginarias β_n están equiespaciadas como se menciona anteriormente.

Una vez clarificada esta elección inicial, el procedimiento completo realizado en el módulo *SISO2* para la identificación de una respuesta en frecuencia es el siguiente:

1. Se parte del orden y los polos iniciales escogidos de manera automática.
2. Se realiza una identificación para este orden inicial mediante VF, aplicado de manera iterativa N_{iter} veces. Por defecto, $N_{iter} = 15$.
3. Si se cumple que $\theta_{error} < \theta_{tolerancia}$ para este orden, la identificación finaliza.
4. Si por el contrario, $\theta_{error} > \theta_{tolerancia}$, el orden de identificación se aumenta en 2 ($N \rightarrow N + 2$). Para ello se añade una pareja de polos complejos conjugados con parte imaginaria localizada en la mitad del rango de frecuencias.
5. Este proceso continúa hasta que se cumpla para un orden $\theta_{error} < \theta_{tolerancia}$. También se especifica un orden máximo de identificación que no se puede sobrepasar, $N_{max} = 20 \cdot r$.
6. Se muestran los resultados obtenidos por pantalla: el diagrama polo-cero, el error de fase para todos los puntos frecuenciales en el orden final, y también el módulo y la fase de la respuesta inicial y de la función de transferencia identificada.

El programa trabaja con algunas opciones por defecto, que son $\theta_{tolerancia} = 0.5^\circ$ y mostrar en el diagrama polo-cero solo los polos resonantes; es decir, los que son más críticos para representar la dinámica del sistema. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de los resultados mostrados por el programa tras identificar una respuesta frecuencial, utilizando las opciones por defecto.

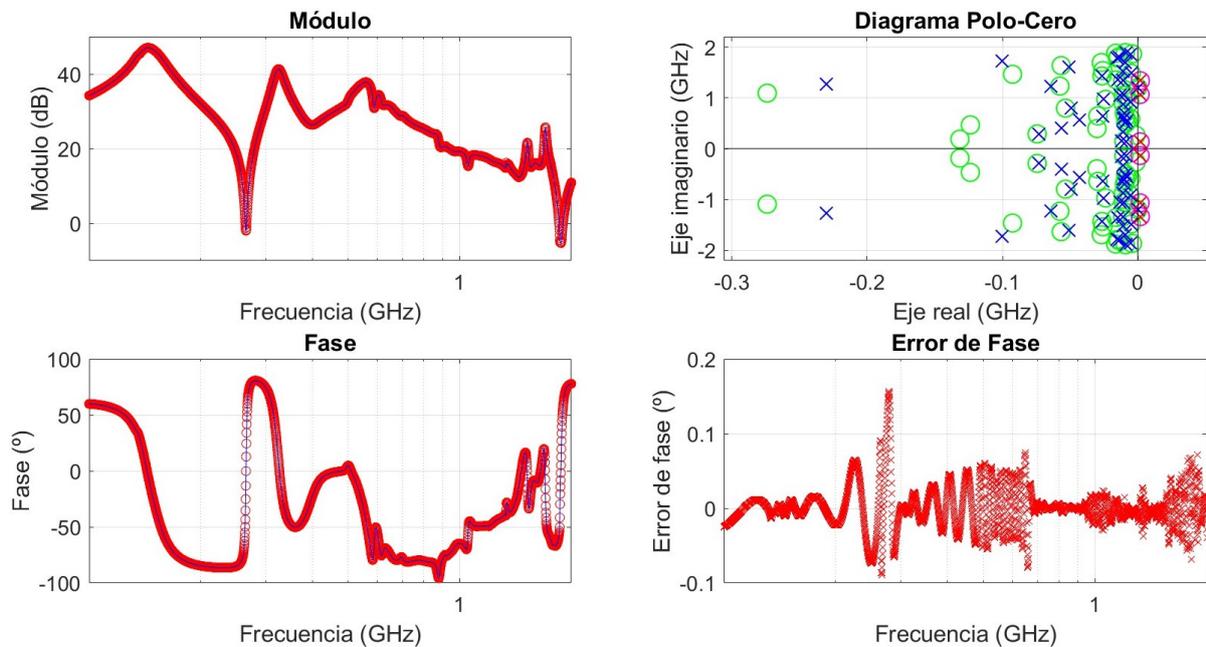


Figura 1: Resultados de identificación mostrados por el programa de Matlab. Ejemplo.

En el diagrama polo-cero se puede apreciar que la respuesta en frecuencia es inestable, ya que hay tres parejas de polos complejos conjugados en el semiplano derecho del plano complejo. En el caso del error de fase, se observa cómo el error de fase máximo es menor que 0.5° para todos los puntos frecuenciales.

3. Mejoras propuestas en el algoritmo automático de identificación de Vector Fitting

Como se ha mencionado anteriormente, la identificación mediante VF puede ser lenta para respuestas complejas. En este apartado se presentan los métodos propuestos para reducir el tiempo de identificación cuando se utiliza VF, modificando para ello el algoritmo realizado por L.Mori en Matlab [15].

El elevado tiempo que tardan en ejecutarse algunas de las identificaciones polo-cero está causado principalmente por dos motivos:

- La identificación para cada orden es lenta cuando el problema es numéricamente complejo.
- Hay que realizar identificaciones con muchos órdenes diferentes hasta llegar al orden final para el que se cumple la condición de la tolerancia de fase.

Para ilustrar el elevado tiempo que tardan en realizarse algunas identificaciones mediante VF, se emplea como ejemplo la respuesta GaN5, para la que la identificación tarda 62.4 s en realizarse. El rango de frecuencias de esta respuesta abarca desde $f_{min} = 0.2$ MHz a $f_{max} = 18.9$ GHz y cuenta con 1511 puntos frecuenciales. La respuesta tiene 40 resonancias, por lo que el orden inicial por el que empieza la identificación es 80, y para que se cumpla la condición de la tolerancia de fase el orden tiene que aumentar hasta 206.

El elevado tiempo que tarda en realizarse la identificación en este caso se debe a los dos motivos mencionados anteriormente. Por un lado, el tiempo que tarda en realizarse la identificación para cada orden aumenta considerablemente según este va haciéndose más grande, y por otro lado el incremento de orden se realiza de 2 en 2 desde orden 80 hasta orden 206, por lo que se realizan 64 identificaciones. En la Figura 2 se muestra el tiempo de identificación acumulado para cada orden para esta respuesta con $\theta_{tolerancia} = 0.5^\circ$.

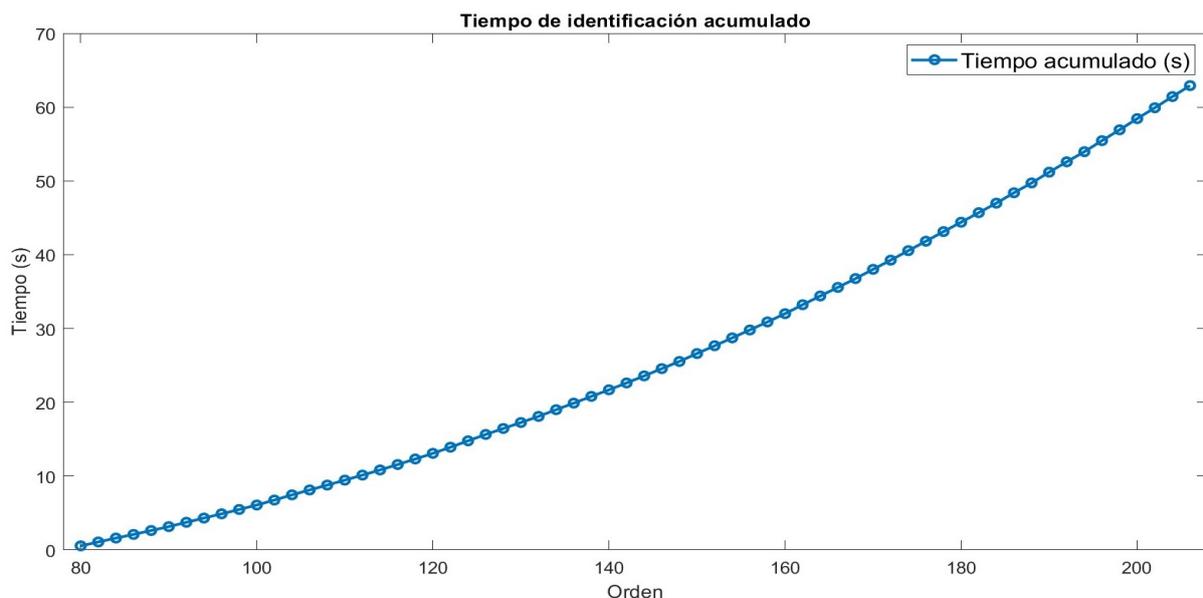


Figura 2: Tiempo de identificación acumulado según el orden de identificación aumenta. Ejemplo de identificación larga utilizando la respuesta en frecuencia GaN5.

En la Figura 2 se puede observar como el tiempo de identificación es mayor para los órdenes mayores, ya que el tiempo de identificación acumulado no varía de forma lineal, también se puede apreciar el gran número de identificaciones realizadas hasta llegar al orden final para el que se cumple que $\theta_{error} < \theta_{tolerancia}$ para todos los puntos frecuenciales.

Para resolver el primer problema se evalúa si la elección de los polos iniciales condiciona el tiempo de identificación de cada orden. Debido al carácter iterativo de VF obteniendo conjuntos de polos mejorados a partir de los iniciales, una elección más adecuada de estos podría llevar a que se redujese el tiempo empleado en realizar cada identificación.

Las dos propuestas que se han evaluado en este Trabajo de Fin de Grado son colocar los polos iniciales en las resonancias de la respuesta en frecuencia, en lugar de equiespaciados a lo largo del rango de frecuencias, y emplear como polos iniciales para la respuesta en frecuencia los polos obtenidos con DACWIN.

Como se ha mencionado anteriormente, al realizar la identificación mediante DACWIN se parte la banda de frecuencias en sub-bandas. Esto hace que, aunque DACWIN se ejecute por lo general en menos tiempo que VF, sea un algoritmo menos robusto y proporcione un modelo menos completo del sistema analizado. A pesar de ello, la posición de estos polos debería ser más cercana a la de los polos finales de VF que los que se emplean en el algoritmo original, equiespaciados a lo largo de la banda de frecuencias.

Para solucionar el segundo inconveniente, en este trabajo se propone como solución aumentar el incremento de orden, para así reducir el número de identificaciones realizadas. Aunque se aumente el incremento de orden, es importante destacar que la identificación tiene que finalizar para el primer orden en el que $\theta_{error} < \theta_{tolerancia}$, al igual que en el algoritmo original.

Los efectos de estas propuestas sobre el tiempo de identificación se han analizado sobre 8 respuestas en frecuencia:

- Sa28, Sa30 y Sa31, cuyo rango de frecuencias abarca desde $f_{min} = 0.1$ GHz a $f_{max} = 2.0$ GHz, y que tienen 2604 puntos frecuenciales.
- GaN1, GaN2, GaN3, GaN4 y GaN5, cuyo rango de frecuencias abarca desde $f_{min} = 0.2$ MHz a $f_{max} = 18.9$ GHz, y que tienen 1511 puntos frecuenciales.

A partir de ahora se habla de programa original en referencia al algoritmo de identificación polo-cero mediante VF realizado por L. Mori sin modificar, y de programa modificado en referencia al programa cuando se le ha implementado alguna de las diferentes propuestas que se van a evaluar en este trabajo para reducir el tiempo de la identificación.

En la Tabla 1 se muestra el orden inicial y final que toman las identificaciones para las respuestas en frecuencia utilizadas, el número de identificaciones realizadas y el tiempo que tarda el proceso de identificación completo en realizarse (t_{orig}). Estos datos se han tomado para el programa original con la opción por defecto de la tolerancia de fase, $\theta_{tolerancia} = 0.5^\circ$. El tiempo que tarda la identificación en realizarse se ha calculado mediante la funcionalidad *Run and Time* de Matlab y es el tiempo que tarda en ejecutarse el módulo *Vecfit3*, en el que está implementado VF, para una respuesta en frecuencia determinada.

Hay que tener en cuenta que los tiempos de identificación obtenidos pueden experimentar pequeñas variaciones cada vez que se ejecuta la identificación.

Tabla 1: Características de las identificaciones de las respuestas en frecuencia empleadas para implementar las diferentes propuestas de reducción del tiempo de identificación. Se muestran los tiempos, los órdenes iniciales y finales de identificación y el número de identificaciones realizadas empleando el algoritmo original con tolerancia de fase 0.5° .

Resp_Frec	Orden Inicial	Orden Final	Identificaciones	$t_{orig}(s)$
Sa28	30	76	24	10.4
Sa30	28	76	25	10.6
Sa31	34	72	20	8.7
GaN1	84	166	42	34.6
GaN2	90	216	64	66.9
GaN3	48	88	21	7.9
GaN4	74	140	34	21.7
GaN5	80	206	64	62.4

3.1. Polos iniciales colocados en las resonancias

En primer lugar, para evaluar si variar la colocación de los polos iniciales condiciona el tiempo de identificación de cada orden, se colocan los polos iniciales en las resonancias de la respuesta en frecuencia.

Para implementar esta propuesta se calcula el número de resonancias de la respuesta (r) y las frecuencias a las que estas suceden. Después, se asocia una pareja de polos complejos conjugados $\{p_{2n-1}^{inicial}, p_{2n}^{inicial}\}$ a cada frecuencia angular de resonancia $\{w_n\}$ de la siguiente manera:

$$p_{2n-1}^{inicial} = (-0.01 - i) \cdot w_n, \quad p_{2n}^{inicial} = (-0.01 + i) \cdot w_n \quad n \in \{1, \dots, r\} \quad (9)$$

Primero, se modifica el módulo *Count_slope* para distinguir entre los cambios de pendiente de la respuesta en frecuencia producidos por resonancias y los producidos por valles.

Después, en el módulo *Calcinpoles* modificado se vincula a cada resonancia una pareja de polos complejos conjugados cuya parte imaginaria es la frecuencia de resonancia, y cuya parte real es negativa y 100 veces menor.

El orden inicial es el mismo que en el programa original, el doble del número de resonancias, pero cambia la distribución de los polos iniciales, que antes se encontraban equiespaciados a lo largo de la banda de frecuencias.

En la Tabla 2 se muestra la comparativa entre los tiempos de identificación en el programa original y con esta implementación, tomando como ejemplo las respuestas que se mencionan en el apartado anterior.

Se muestran los tiempos de identificación utilizando el programa original (t_{orig}) y utilizando el programa que coloca los polos iniciales en las resonancias ($t_{in.res}$), así como la diferencia entre ambos tiempos ($\Delta t = t_{orig} - t_{in.res}$) y el porcentaje del tiempo original que representa esa diferencia de tiempos ($\Delta t(\%)$). Se ha utilizado la tolerancia de fase por defecto $\theta_{tolerancia} = 0.5^\circ$.

Tabla 2: Comparación entre el tiempo que tarda en realizar la identificación el algoritmo original y el algoritmo que coloca los polos iniciales en las resonancias utilizando una tolerancia de fase de 0.5° .

Resp_Frec	$t_{orig}(s)$	$t_{in.res}(s)$	$\Delta t(s)$	$\Delta t(\%)$
Sa28	10.4	10.3	0.1	0.96 %
Sa30	10.6	10.6	0.0	0.00 %
Sa31	8.7	8.7	0.0	0.00 %
GaN1	34.6	34.5	0.1	0.29 %
GaN2	66.9	64.9	2.0	2.99 %
GaN3	7.9	7.9	0.0	0.00 %
GaN4	21.7	21.7	0.0	0.00 %
GaN5	62.4	60.9	1.5	2.40 %

Se puede observar que no hay ahorro de tiempo destacable colocando los polos iniciales en las resonancias, los tiempos de ejecución son prácticamente idénticos en ambos casos.

Por tanto, se puede concluir que colocar los polos iniciales en las resonancias no es relevante para reducir el tiempo de identificación de cada orden, ya que para ninguna de las respuestas en frecuencia analizadas se reduce el tiempo de identificación de manera significativa con esta nueva disposición de los polos iniciales.

3.2. Polos obtenidos mediante DACWIN empleados como polos iniciales

En segundo lugar, se analiza si utilizar los polos obtenidos mediante el método DACWIN como polos iniciales para realizar la identificación de una respuesta en frecuencia condiciona el tiempo de identificación de cada orden.

Para implementar esta posible mejora se introducen de forma manual en el módulo *SISO2* los polos obtenidos mediante DACWIN para la respuesta en frecuencia que se esté analizando. Al hacer esto se modifica el orden inicial respecto al calculado originalmente mediante el módulo *Count_slope*, y por supuesto varían los polos iniciales respecto a los calculados mediante *Calcinpoles*.

Introducir de manera manual los polos obtenidos mediante DACWIN para todas las respuestas en frecuencia es un proceso laborioso, por lo que se comienza probando la utilidad de la propuesta para reducir el tiempo de la identificación solamente en 3 de las respuestas utilizadas hasta ahora: Sa28, Sa30 y Sa31.

En caso de que la propuesta diese buenos resultados se podría planter implementar el método DACWIN en Matlab como alternativa para el cálculo de los polos iniciales o sistematizar la extracción de los polos de DACWIN obtenidos a partir de STAN.

En la Tabla 3 se comparan los tiempos de identificación empleando el algoritmo original (t_{orig}) y utilizando DACWIN para calcular los polos iniciales ($t_{in.dac}$), así como la diferencia entre ambos tiempos ($\Delta t = t_{orig} - t_{in.dac}$) y el porcentaje del tiempo original que representa esa diferencia de tiempos ($\Delta t(\%)$) para las tres respuestas indicadas.

Hay que tener en cuenta que DACWIN también tarda un tiempo en ejecutarse en la herramienta STAN; pero, como solo se pretende comprobar si el tiempo de identificación

utilizando VF se reduce a partir de la diferente colocación de los polos iniciales, no se ha incluido en los cálculos.

Se utiliza la tolerancia de fase por defecto $\theta_{tolerancia} = 0.5^\circ$.

Tabla 3: Comparación entre el tiempo que tarda en realizar la identificación el algoritmo original y el algoritmo que utiliza los polos obtenidos mediante DACWIN como polos iniciales utilizando una tolerancia de fase de 0.5° .

Resp_Frec	t_{orig}(s)	t_{in.dac}(s)	Δt(s)	Δt(%)
Sa28	10.4	5.1	5.3	50.96%
Sa30	10.6	6.3	4.3	40.57%
Sa31	8.7	2.4	6.3	72.41%

Se puede observar que el método propuesto reduce los tiempos de identificación para las respuestas en frecuencia analizadas de manera considerable, obteniéndose reducciones de tiempo superiores al 40% para las tres respuestas. Sin embargo, la utilidad del método depende del motivo de esta reducción:

- Si el motivo es que se reduce el tiempo de identificación para cada orden, haciendo esto que el tiempo total se reduzca, el método resultaría de gran utilidad. Una vez comprobado su funcionamiento con más respuestas en frecuencia, se podría implementar en MATLAB como sustitución/complemento al módulo *Calcinpoles*, y se podría combinar con otros métodos que resolviesen el segundo problema presente: la identificación para demasiados ordenes hasta llegar al orden final.
- Si, al contrario, el ahorro de tiempo se debe únicamente al orden inicial mayor al utilizar estos polos, y por tanto a la reducción en el número de identificaciones, no resultaría tan interesante. Hay métodos más sencillos de implementar para tratar de reducir el número de identificaciones realizadas, como los que se proponen más adelante en este trabajo aumentando el incremento de orden a un valor mayor que 2.

Para saber a cuál de estos dos motivos se debe el ahorro de tiempo, en primer lugar, en la Tabla 4 se indican el orden inicial y el orden final que toma la identificación en el programa original y en el programa que utiliza como polos iniciales los obtenidos mediante DACWIN.

Tabla 4: Orden inicial y final de la identificación en el programa original y utilizando los polos obtenidos mediante DACWIN como polos iniciales (programa modificado).

Resp_Frec	Programa original		Programa modificado	
	Orden inicial	Orden final	Orden inicial	orden final
Sa28	30	76	60	76
Sa30	28	76	54	76
Sa31	34	72	66	72

A continuación, se ha realizado la identificación para las 3 respuestas mediante el programa original forzando que el orden inicial sea el empleado al utilizar los polos iniciales de DACWIN.

Si este tiempo es similar al tiempo $t_{in,dac}$ mostrado en la Tabla 3 para todas las respuestas en frecuencia, esto significa que el ahorro de tiempo que se obtenía al principio estaba causado solamente por el orden inicial mayor al utilizar los polos de DACWIN como polos iniciales.

Para realizar esta comparativa de manera más detallada, se ha representado el tiempo de identificación para cada orden en el programa original y en el programa modificado, desde el orden inicial obtenido mediante DACWIN hasta el orden final.

En la Figura 3 se representan los tiempos de ejecución para cada orden desde orden 60 hasta orden 76 para la respuesta Sa28. En color azul se muestran los tiempos en el programa original, al que se le ha forzado a empezar en orden 60 para poder realizar la comparativa, y en color naranja los tiempos para el programa que utiliza los polos de DACWIN como polos iniciales.

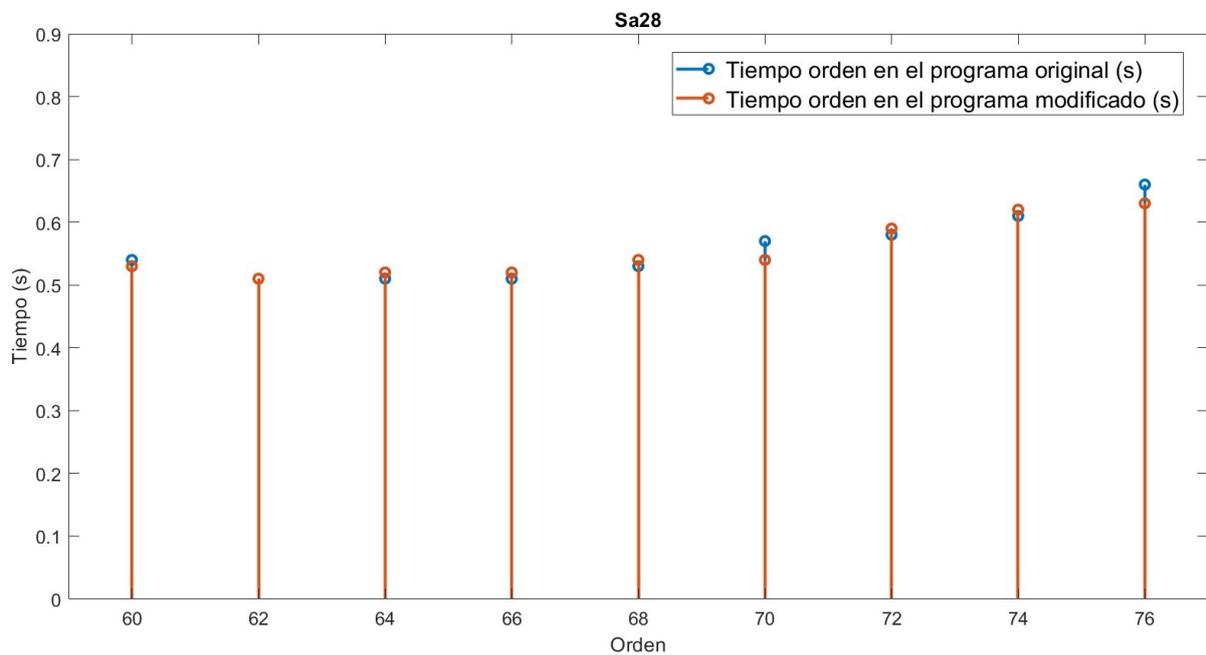


Figura 3: Comparativa entre los tiempos de identificación para cada orden en el programa original y en el programa que utiliza los polos de DACWIN como polos iniciales para la respuesta Sa28, desde orden inicial 60 hasta orden final 76.

Se puede observar que los tiempos de identificación para cada orden son prácticamente idénticos, por lo que no se observa ninguna reducción significativa en el tiempo de identificación de cada orden utilizando como polos iniciales los obtenidos mediante DACWIN para la respuesta Sa28.

En la Figura 4(a) se representan los tiempos de ejecución para cada orden desde orden 54 hasta orden 76 para la respuesta Sa30. En color azul se muestran los tiempos en el programa original, al que se le ha forzado a empezar en orden 54, y en color naranja los tiempos para el programa que utiliza los polos de DACWIN como polos iniciales.

Se realiza la misma comparativa para la tercera respuesta en frecuencia, Sa31. En la Figura 4(b) se representan los tiempos de ejecución para cada orden desde orden 66 hasta orden 72 para la respuesta Sa31. En color azul se muestran los tiempos en el programa original, al que se le ha forzado a empezar en orden 66, y en color naranja los tiempos para el programa que utiliza los polos de DACWIN como polos iniciales.

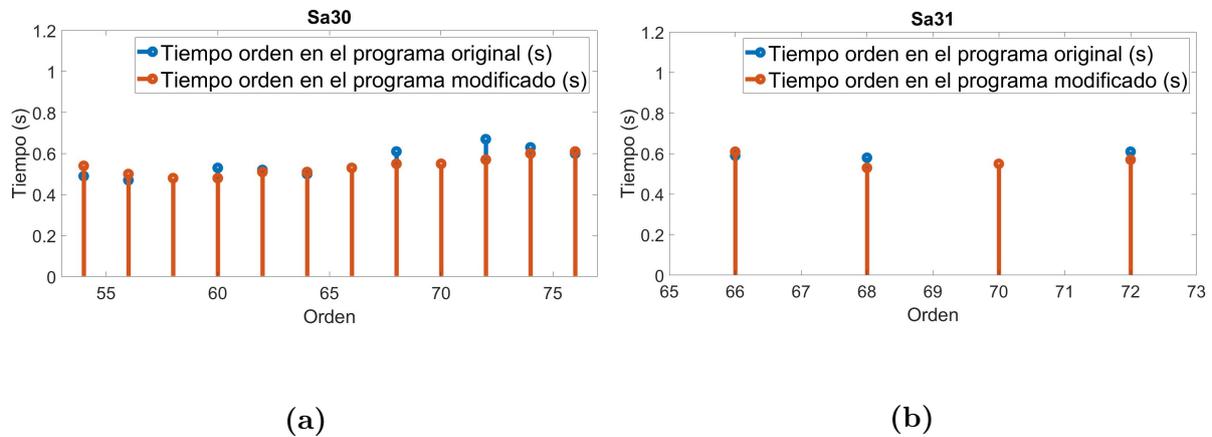


Figura 4: Comparativa entre los tiempos de identificación para cada orden en el programa original y en el programa que utiliza los polos de DACWIN como polos iniciales (a) para la respuesta Sa30, desde orden inicial 54 hasta orden final 76, y (b) para la respuesta Sa31, desde orden inicial 66 hasta orden final 72.

En la Figura 4 se puede observar que los tiempos de identificación para cada orden son prácticamente idénticos utilizando el algoritmo original y utilizando como polos iniciales los polos calculados por DACWIN, tanto en la respuesta Sa30 como en la respuesta Sa31.

Por tanto, se puede extraer de este análisis que la mayor cercanía de los polos de DACWIN a los polos del sistema no es relevante para acelerar la identificación para cada orden mediante VF, sino que el ahorro de tiempo obtenido inicialmente mediante este método se debía únicamente al orden inicial más alto.

Estos resultados y los obtenidos en el apartado anterior indican que la mayor cercanía de los polos en los métodos planteados no es relevante para reducir el tiempo de identificación de cada orden mediante VF, por lo que para reducir el tiempo total de identificación es necesario realizar identificaciones para menos órdenes.

Hay que tener en cuenta que la selección de los polos iniciales realizada en el programa original es la recomendada por Bjørn Gustavsen y Adam Semlyen en [16]-[18]. Por ello, de los resultados obtenidos no se concluye que la colocación de los polos iniciales pueda ser arbitraria, sino que la distribución de estos de manera equiespaciada a lo largo del rango de frecuencias es suficientemente buena, y que la elección de polos más cercanos no es relevante para el ahorro de tiempo en la identificación.

3.3. Aumento del incremento de orden a un valor fijo

La propuesta que se realiza para que el algoritmo realice identificaciones para menos órdenes es aumentar el incremento de orden, que en el programa original se realiza siempre de 2 en 2.

La primera propuesta para aumentar el incremento de orden es hacerlo a un valor fijo m mayor que 2, reduciendo así el número de identificaciones realizadas.

Aplicando este nuevo método, los pasos necesarios para realizar la identificación mediante VF son los siguientes:

1. El proceso para escoger el orden inicial y los polos iniciales es el mismo que en el programa original.
2. Partiendo de este orden inicial se van realizando las sucesivas identificaciones. Mientras el error de fase (θ_{error}) sea mayor que la tolerancia de fase ($\theta_{tolerancia}$), se continúa aumentando el orden de m en m ($N \rightarrow N + m$).
3. Una vez que $\theta_{error} < \theta_{tolerancia}$, ya no se aumenta más el orden. Que esto ocurra significa que para el orden final N_{final} se cumple la condición de tolerancia de fase pero que para el anterior orden identificado $N_{final} - m$ no se cumplía.
4. Se retrocede en el orden de 2 en 2 hasta que de nuevo $\theta_{error} > \theta_{tolerancia}$. Este es el último orden para el que se cumple esta condición, por lo que el que se busca para la identificación es el siguiente orden par.

Para retroceder en el orden de dos en dos es necesario eliminar una pareja de polos complejos conjugados. La pareja de polos elegida es la que tenga mayor parte imaginaria de las que se encuentren fuera de la banda de resonancia ($w_{min} \rightarrow w_{max}$), puesto que es la menos relevante para la identificación.

5. Se aumenta el orden en 2. Este es el orden final que toma la identificación.

Se plantea utilizar como incremento de orden fijo $m = 10$, ya que se considera que el balance entre las identificaciones ahorradas aumentando el orden de 10 en 10 y las identificaciones extra producidas al volver hacia atrás en el orden es adecuado.

Con un incremento de orden demasiado grande, volver hacia atrás en el orden puede provocar un gran número de identificaciones extra, y con un incremento de orden demasiado pequeño el número de identificaciones ahorradas es limitado.

Siguiendo este método con $m = 10$, se evitaría realizar un número considerable de identificaciones. En la Tabla 5 se muestra el potencial ahorro de identificaciones (ΔI) aplicando este proceso para las respuestas en frecuencia con las que se ha trabajado hasta ahora. I_1 e I_2 hacen referencia al número de identificaciones realizadas en el programa original y en el programa con incremento de orden 10, respectivamente.

Tabla 5: Ahorro potencial de identificaciones ΔI con incremento de orden 10 para diferentes respuestas en frecuencia.

Resp_Frec	Orden Inicial	Orden Final	$I_1(N \rightarrow N + 2)$	$I_2(N \rightarrow N + 10)$	ΔI
Sa28	30	76	24	10	14
Sa30	28	76	25	9	16
Sa31	34	72	20	8	12
Gan1	84	166	42	16	26
GaN2	90	216	64	18	46
GaN3	48	88	21	7	14
GaN4	74	140	33	12	21
GaN5	80	206	64	18	46

Se puede ver que la reducción potencial de identificaciones es considerable, particularmente en las respuestas más largas. Además, hay que tener en cuenta que en estas respuestas se evitan identificaciones con órdenes altos que causan un gran consumo de tiempo.

No obstante, cuando se implementó este método y se analizaron las identificaciones realizadas se observó que el orden final obtenido no se correspondía con el obtenido en el algoritmo original.

A la vista de los resultados obtenidos, se dedujeron dos posibles causas para estas discrepancias en el orden final que hicieron que hubiese que descartar el método.

En primer lugar, el error de fase sigue una tendencia descendente según se aumenta el orden, pero presenta pequeñas fluctuaciones. Esto provoca que para un orden mayor el error de fase pueda ser ligeramente mayor que para ordenes anteriores, y si sucede cerca del límite de la tolerancia de fase puede ser muy problemático.

Un ejemplo teórico que ilustra esta situación es el siguiente, tomando la tolerancia de fase como 0.5° :

- Se tiene una respuesta en frecuencia que comienza la identificación con un orden inicial 20.
- Para esta respuesta, $\theta_{error} < 0.5^\circ$ por primera vez para orden 48, por lo que este es el orden final que debe tomar la identificación.
- Sin embargo, el valor de θ_{error} oscila ligeramente alrededor de ese orden, causando que para orden 50 $\theta_{error} > 0.5^\circ$. Para orden 52, θ_{error} vuelve a caer por debajo de 0.5° y se mantiene así para ordenes superiores.
- La identificación se realiza desde orden 20 hasta orden 60, ya que el incremento de orden es de 10 y hasta orden 60 no se había detectado ningún $\theta_{error} < 0.5^\circ$.
- Se vuelve hacia atrás de dos en dos hasta que de nuevo $\theta_{error} > 0.5^\circ$ (orden 50), y por tanto la identificación finaliza con orden 52, en vez de con orden 48.

Para solucionar este problema, habría que ir hacia atrás en el orden hasta detectar la primera vez que $\theta_{error} < 0.5$. Esto haría el proceso considerablemente más costoso, contrarrestando la reducción en el número de identificaciones lograda.

En la Figura 5 se observan las fluctuaciones del error de fase para la respuesta en frecuencia Sa28, aunque en este caso no están localizadas en el rango límite con la tolerancia de fase.

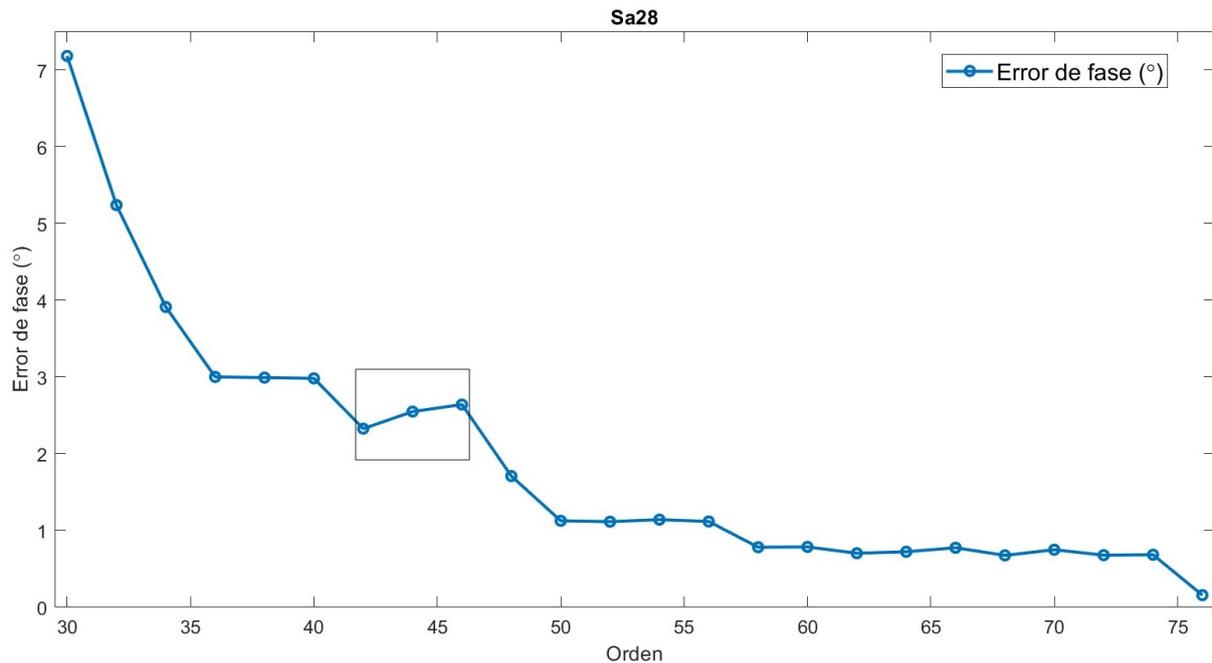


Figura 5: Ejemplo de las fluctuaciones en el error de fase utilizando la respuesta en frecuencia Sa28.

La zona en la que se produce la mayor fluctuación está indicada dentro del recuadro. En este caso, θ_{error} es mayor para orden 46 que para orden 44, y para este último orden es a su vez mayor que para orden 42. Después, para orden 48, θ_{error} vuelve a disminuir. También se pueden apreciar otras pequeñas fluctuaciones en otras zonas del gráfico.

Si estas fluctuaciones se produjeran para órdenes cercanos al límite con la tolerancia de fase podría ocurrir el problema mencionado anteriormente si se utilizase este método y producirse over-modeling, comprometiendo el correcto funcionamiento de la identificación.

Por otro lado, hay otro inconveniente más relacionado con el error de fase. Al volver hacia atrás en el orden, dependiendo de los polos que se eliminen, no es posible asegurar que el error de fase sea el mismo que se obtendría si se hubiese pasado por ese orden en sentido ascendente, pudiendo provocar esto también que la identificación no se realice correctamente.

Debido a estos dos problemas, es necesario buscar otra manera de realizar identificaciones para menos órdenes que no involucre volver hacia atrás en el orden. En la siguiente sección se propone un método mediante un aumento del incremento de orden adaptativo que resuelve este problema y con el que se ahorra también un gran número de identificaciones.

3.4. Aumento del incremento de orden de manera adaptativa

En esta sección se propone un método que reduce el número de identificaciones realizadas aplicando un incremento de orden variable y que no necesita volver hacia atrás para llegar

al primer orden para el que se cumple la condición de tolerancia de fase.

Volver hacia atrás en el orden se puede evitar si, aunque el incremento de orden sea variable, para los órdenes en los que la condición de tolerancia de fase está más cerca de cumplirse el incremento se realiza de 2 en 2. Por eso, se plantea un método que utilice diferentes incrementos de orden dependiendo de esa condición:

- Si la condición de tolerancia de fase $\theta_{error} < \theta_{tolerancia}$ está lejos de cumplirse, se puede realizar un incremento de orden mayor.
- Según la condición de tolerancia de fase se vaya acercando, se va disminuyendo progresivamente el incremento de orden.
- Cuando la condición esté muy cerca de cumplirse, los incrementos se realizan de 2 en 2. Así, se asegura no tener que volver hacia atrás para buscar el primer orden de identificación para el que se cumple la condición de tolerancia de fase, y se evitan los problemas mencionados en el apartado 3.3.

Por tanto, utilizando este método el aumento del incremento de orden es adaptativo. Ahora es necesario seleccionar los diferentes intervalos y los incrementos de orden que se aplican en cada uno de ellos.

Sin embargo, es arriesgado utilizar únicamente la cercanía del error de fase máximo a la tolerancia de fase como condición para variar el incremento de orden. Esto se debe a que el error de fase máximo para muchas respuestas en frecuencia presenta caídas de su valor muy pronunciadas.

En la Figura 6 se puede apreciar la caída pronunciada en el error de fase para la respuesta GaN4 desde el orden 106 hasta el 110, así como otra caída al inicio, de orden 74 a 76.

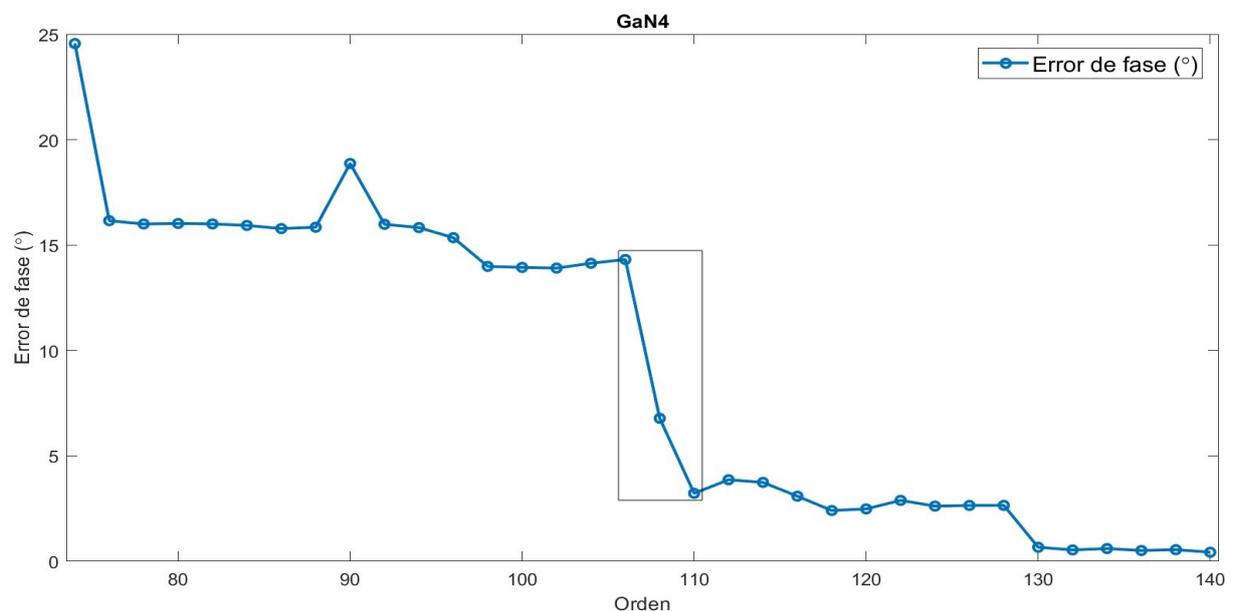


Figura 6: Ejemplo de caída pronunciada en el error de fase máximo para la respuesta en frecuencia GaN4.

Estas caídas bruscas del error de fase máximo pueden ocasionar que se sobrepase el primer

orden para el que se cumple la condición de tolerancia de fase, que es el orden final que debe tomar la identificación. Es posible encontrarse en un orden para el que la condición de tolerancia de fase esté aún lejos, realizar por tanto un gran incremento de orden, y sobrepasar directamente el orden final adecuado si el error de fase máximo cae súbitamente.

Este inconveniente se puede evitar al implementar un método con un aumento del incremento de orden adaptativo si se consideran incrementos de orden conservadores en los diferentes intervalos escogidos, pero también se reduce el potencial de ahorro de identificaciones del método.

Por tanto, para maximizar la eficiencia del método propuesto es necesario encontrar otro parámetro que tenga un comportamiento menos errático, y del cual se derive otra condición que permita realizar incrementos mayores sin temer por la calidad de la identificación.

3.4.1. Utilización del error de fase medio como parámetro adicional

La propuesta que se realiza es utilizar como parámetro adicional el error de fase medio (θ_{error}^{medio}); es decir, el valor que se obtiene al realizar la media de los errores de fase de todos los puntos frecuenciales para un orden determinado. A priori, el error de fase medio debería tener un comportamiento más estable según se aumenta el orden que el error de fase máximo. Siguiendo este razonamiento, la segunda condición podría depender del valor del error de fase medio respecto a la tolerancia de fase.

Para comprobar la hipótesis de que el error de fase medio es más estable, en la Figura 7(a) se muestra su comportamiento para la respuesta GaN4, y en la Figura 7(b) se compara con el error de fase para esta misma respuesta.

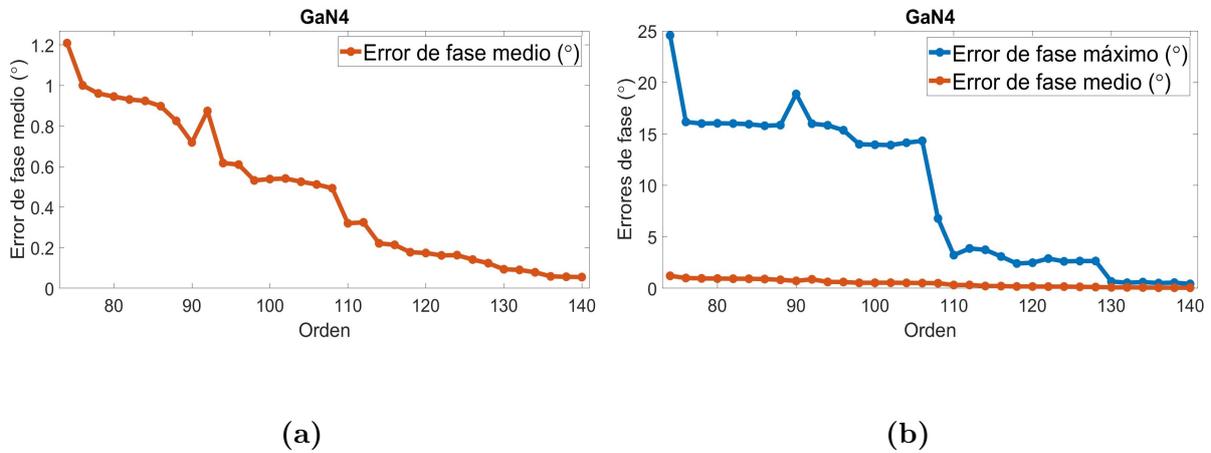


Figura 7: (a) Comportamiento del error de fase medio para la respuesta en frecuencia GaN4 y (b) comparación entre el error de fase medio y el error de fase máximo para esta misma respuesta.

En la Figura 7(a) se puede observar la caída desde el orden 106 al orden 110 en el error de fase medio, pero de manera atenuada. Mientras que en el caso del error de fase máximo hay una caída de 11.09° , para el error de fase medio hay una caída de tan solo 0.19° . Se observa la misma situación atenuada entre los órdenes 74 y 76.

Si se grafican el error de fase y el error de fase medio para otras respuestas en frecuencia se observa una situación similar: el comportamiento del error de fase medio presenta

cambios menos pronunciados. Por tanto, es el parámetro que se ha utilizado para la segunda condición de los incrementos de orden.

3.4.2. Método con incremento adaptativo del orden propuesto

Para decidir cómo combinar la condición del error de fase máximo y la del error de fase medio se han analizado diversas respuestas en frecuencia y se han propuesto los intervalos y los incrementos de orden correspondientes de manera empírica.

Es de gran importancia seleccionar un límite adecuado para el intervalo en el que el incremento de orden pasa a ser dos, ya que realizar incrementos mayores que dos cuando el primer orden para el que se cumple la condición de la tolerancia de fase está cerca conlleva el riesgo de sobrepasarlo.

Tras analizar el comportamiento del error de fase medio para varias respuestas se ha tomado como límite a partir del cual los incrementos de orden se realizan de dos en dos cuando $\theta_{error}^{medio} = \frac{1}{5}\theta_{tolerancia}$. Los intervalos e incrementos se han escogido con el objetivo de que funcionen correctamente para respuestas en frecuencia de características y ordenes de identificación diversos y para diferentes tolerancias de fase objetivo, para ello se ha tenido en cuenta un margen de error suficiente.

El nuevo procedimiento se detalla a continuación:

1. El proceso para escoger el orden inicial y los polos iniciales es el mismo que en el programa original.
2. Partiendo de este orden inicial se van realizando las sucesivas identificaciones, atendiendo a los siguientes criterios para seleccionar el incremento de orden:
 - Mientras $\theta_{error} > 50 \cdot \theta_{tolerancia}$ y $\theta_{error}^{medio} > 5 \cdot \theta_{tolerancia}$, el orden se incrementa de 40 en 40 ($N \rightarrow N + 40$).
 - Mientras $\theta_{error} > 10 \cdot \theta_{tolerancia}$ y $\theta_{error}^{medio} > \theta_{tolerancia}$, el orden se incrementa de 16 en 16 ($N \rightarrow N + 16$).
 - Mientras $\theta_{error} > 2 \cdot \theta_{tolerancia}$ y $\theta_{error}^{medio} > \frac{1}{3}\theta_{tolerancia}$, el orden se incrementa de 8 en 8 ($N \rightarrow N + 8$).
 - Mientras $\theta_{error} > \theta_{tolerancia}$ y $\theta_{error}^{medio} > \frac{1}{5}\theta_{tolerancia}$, el orden se incrementa de 4 en 4 ($N \rightarrow N + 4$).
 - Mientras $\theta_{error} > \theta_{tolerancia}$, pero $\theta_{error}^{medio} < \frac{1}{5}\theta_{tolerancia}$, el orden se incrementa de 2 en 2 ($N \rightarrow N + 2$).
3. Finalmente, cuando $\theta_{error} < \theta_{tolerancia}$ finaliza la identificación.

Hay que recordar que es un criterio extraído de manera empírica y que se podría modificar, consiguiéndose un ahorro de tiempo mayor o menor dependiendo de la respuesta en frecuencia que se analice.

De todas formas, para todas las respuestas que se han analizado se ha obtenido como orden final de la identificación el primer orden para el que se cumple la tolerancia de fase y se ha mantenido un compromiso adecuado entre seguridad y rapidez, aunque para algunas de las identificaciones más largas resulta ser un criterio ligeramente conservador.

Por otro lado, se ha decidido establecer un orden inicial mínimo dependiente de la tolerancia de fase empleada a partir del cual se empieza a aplicar el método propuesto. Si el orden inicial es menor que el orden inicial mínimo, se realiza la identificación aplicando solamente incrementos de orden de 2 en 2. Esta restricción se añade tras realizar varias pruebas aplicando el método para respuestas con orden inicial bajo y con tolerancia de fase menor que 0.4° y observar que el margen de error no es suficiente.

En concreto, el orden mínimo (N_{min}) para el que se aplica el método propuesto en función de la tolerancia de fase es el siguiente:

- Si $0.4 \leq \theta_{tolerancia} \leq 1.0$, $N_{min} = 25$.
- Si $0.1 \leq \theta_{tolerancia} < 0.4$, $N_{min} = 60$.

Se plantea un rango razonable para la tolerancia de fase desde 0.1° hasta 1.0° en el cual se ha comprobado el buen funcionamiento del método.

Para ilustrar el funcionamiento del método propuesto este se aplica para la respuesta en frecuencia GaN5. Cabe recordar que la identificación para esta respuesta en frecuencia utilizando la tolerancia de fase por defecto $\theta_{tolerancia} = 0.5^\circ$ toma orden inicial 80 y realiza 64 identificaciones hasta llegar al orden final 206 utilizando un incremento de orden constante dos, y que la identificación tarda 62.4 s en realizarse.

3.4.3. Ejemplo del método adaptativo para la respuesta GaN5

En este apartado se explica en detalle el funcionamiento del método propuesto para la respuesta GaN5. Se presentan diferentes gráficas para visualizar los intervalos con incrementos de orden diferentes, y se explica la evolución de las condiciones del error de fase y del error de fase medio.

Se ha representado la evolución del error de fase y del error de fase medio en función del orden para los diferentes intervalos, y su valor en relación con las condiciones impuestas para la variación del incremento de orden.

Estas condiciones están representadas mediante líneas horizontales, y el efecto que tienen sobre la variación del incremento de orden es el explicado en el apartado 3.4.2.

En primer lugar, en la Figura 8 se muestra cómo se incrementa el orden de 40 en 40 desde el orden inicial 80 hasta el orden 120.

El procedimiento que sigue el nuevo método es el siguiente:

- Para orden 80, en la Figura 8(a) se aprecia que $\theta_{error} > 50 \cdot \theta_{tolerancia}$ y en la Figura 8(b) se observa que $\theta_{error}^{medio} > 5 \cdot \theta_{tolerancia}$. Por tanto, el siguiente orden identificado es $80 + 40 = 120$.
- Para orden 120, $\theta_{error} > 50 \cdot \theta_{tolerancia}$ pero $\theta_{error}^{medio} < 5 \cdot \theta_{tolerancia}$. Se sigue cumpliendo que $\theta_{error}^{medio} > \theta_{tolerancia}$, por lo que se pasa al intervalo de incremento 16, como se verá a continuación.

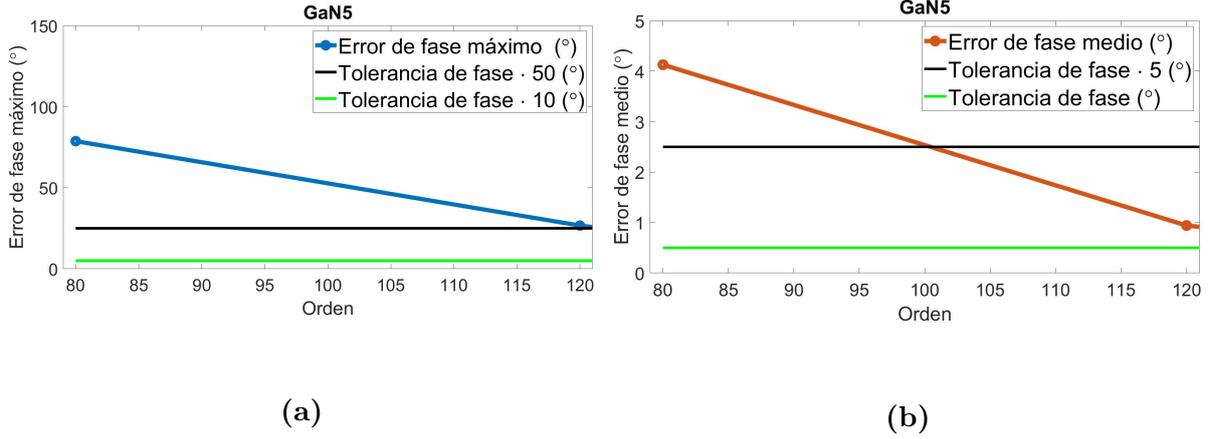


Figura 8: (a) Error de fase y (b) error de fase medio desde orden 80 hasta orden 120 para la respuesta GaN5.

En la Figura 9 se observa lo que sucede desde orden 120 hasta orden 136, intervalo en el que el incremento de orden es de 16.

El procedimiento que sigue el nuevo método en este caso es el siguiente:

- Para orden 120, en la Figura 9(a) se aprecia que $\theta_{error} > 10 \cdot \theta_{tolerancia}$ y en la Figura 9(b) se observa que $\theta_{error}^{medio} > \theta_{tolerancia}$. Por tanto, el siguiente orden identificado es $120 + 16 = 136$.
- Para orden 136, aunque $\theta_{error} > 10 \cdot \theta_{tolerancia}$, $\theta_{error}^{medio} < \theta_{tolerancia}$ por muy poco. Por tanto, a partir de este orden se avanza de 8 en 8.

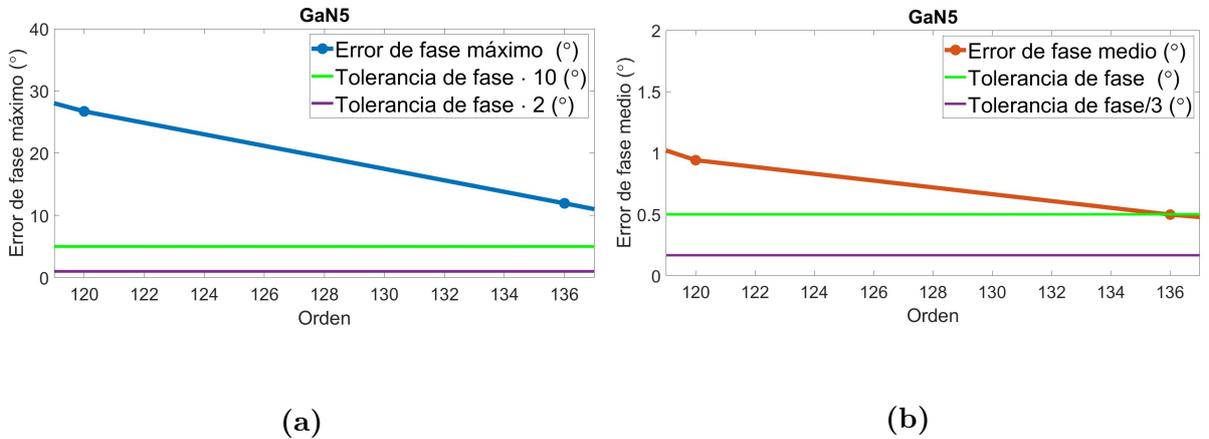


Figura 9: (a) Error de fase y (b) error de fase medio desde orden 120 hasta orden 136 para la respuesta GaN5.

En la Figura 10 se observa lo que sucede desde orden 136 hasta orden 168, en este intervalo el incremento se realiza de 8 en 8.

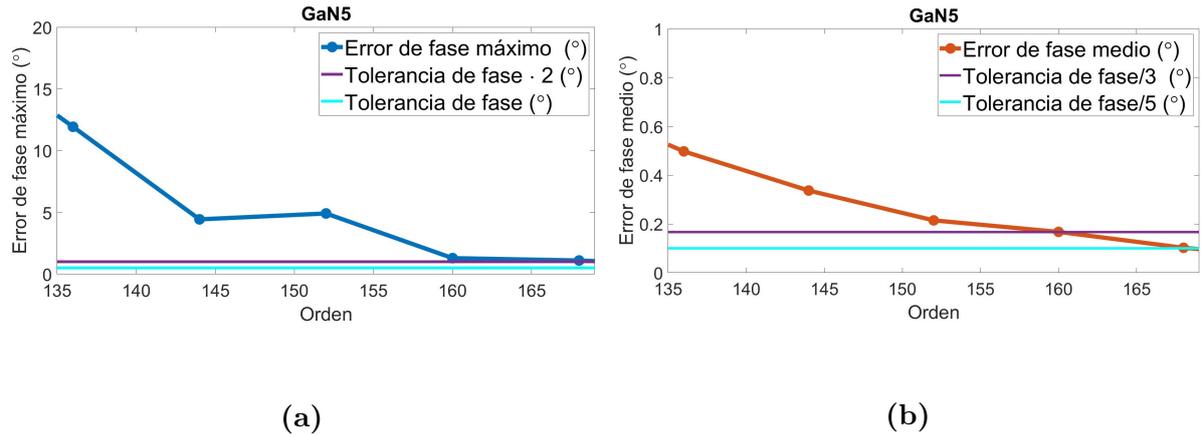


Figura 10: (a) Error de fase y (b) error de fase medio desde orden 136 hasta orden 168 para la respuesta GaN5.

El procedimiento que sigue el nuevo método en este caso es el siguiente:

- Desde orden 136 hasta orden 160, en la Figura 10(a) se aprecia que $\theta_{error} > 2 \cdot \theta_{tolerancia}$ y en la Figura 10(b) se observa que $\theta_{error}^{medio} > \frac{1}{3}\theta_{tolerancia}$. Por tanto, se aumenta el orden de 8 en 8 hasta orden $160+8=168$.
- Para orden 168, es difícil de apreciar, pero $\theta_{error} > 2 \cdot \theta_{tolerancia}$; sin embargo $\theta_{error}^{medio} < \frac{1}{3}\theta_{tolerancia}$, por lo que se pasa al intervalo con incremento de orden 4. Por otro lado, $\theta_{error}^{medio} > \frac{1}{5}\theta_{tolerancia}$ para orden 168 por muy poco, si fuese menor que esa condición se pasaría directamente del intervalo con incremento de orden 8 al intervalo con incremento de orden 2.

En la Figura 11 se muestra el resto de la identificación, de orden 168 a 172 se incrementa el orden de 4 en 4, y a partir de orden 172 hasta el orden final 206 se incrementa el orden de 2 en 2.

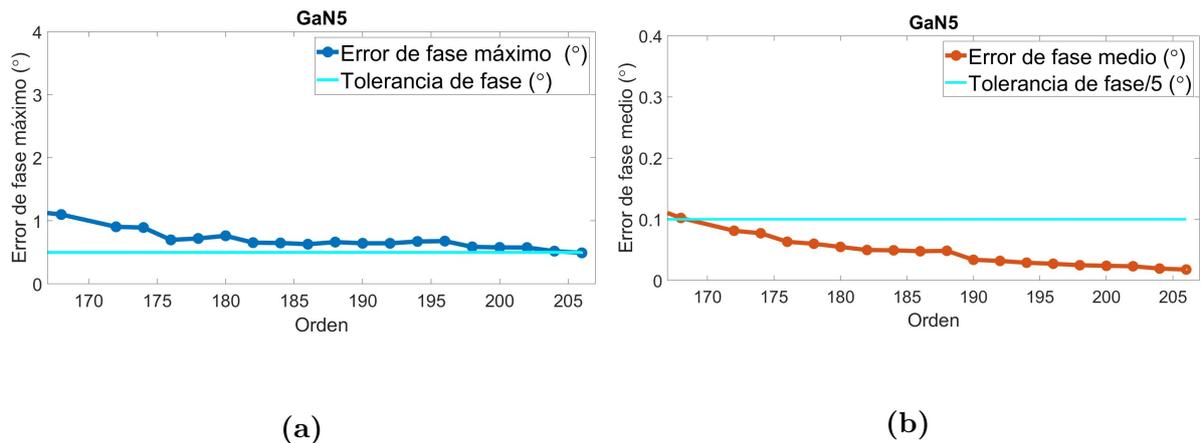


Figura 11: (a) Error de fase y (b) error de fase medio desde orden 168 hasta orden 206 para la respuesta GaN5.

El procedimiento seguido es el siguiente:

- Para orden 168, en la Figura 11(a) se aprecia que $\theta_{error} > \theta_{tolerancia}$ y en la Figura 11(b) se observa que $\theta_{error}^{medio} > \frac{1}{5}\theta_{tolerancia}$. Por tanto, se aumenta el orden de 4 en 4 hasta orden $168+4=172$.
- Para orden 172, $\theta_{error}^{medio} < \frac{1}{5}\theta_{tolerancia}$, por lo que la identificación se realiza aumentando el orden de 2 en 2 hasta que $\theta_{error} < \theta_{tolerancia}$ para el orden final 206.

Para una identificación larga como la de la respuesta GaN5 el criterio es conservador y se realizan 18 identificaciones con un incremento de orden 2 en el intervalo desde orden 172 al orden final 206.

A continuación, en la Figura 12 se muestra el proceso de identificación completo utilizando un incremento de orden adaptativo en comparación con el realizado en el programa original para observar con más claridad la realización de la identificación y los diferentes incrementos de orden utilizados, para ello se ha representado el error de fase máximo en función del orden.

En la Figura 12(a) se observa cómo todos los incrementos de orden se realizan de dos en dos en el programa original y en la Figura 12(b) se pueden observar los diferentes incrementos de orden realizados aplicando el método con incremento del orden adaptativo.

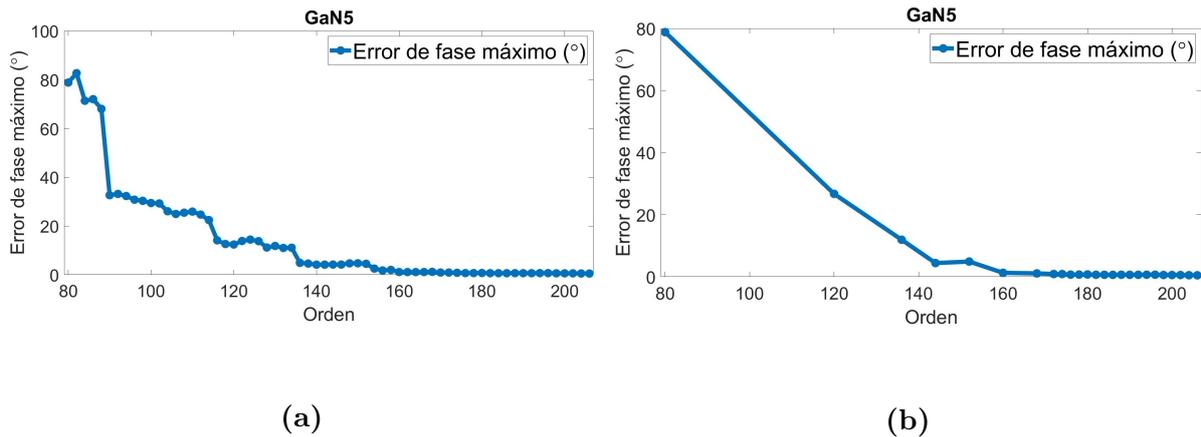


Figura 12: Evolución del proceso de identificación utilizando (a) el programa original y (b) el método propuesto con incremento de orden adaptativo para la respuesta GaN5 con tolerancia de fase 0.5° . Se obtiene un ahorro de tiempo del 50.16 % utilizando el método con incremento del orden adaptativo.

Se puede observar la gran cantidad de identificaciones ahorradas en la mitad izquierda de la Figura 12(b), y cómo el ahorro es menor en el tramo final.

En la Tabla 6 se muestra una comparativa entre la identificación utilizando el programa original y el método con incremento del orden adaptativo propuesto para la respuesta GaN5.

Se muestran los tiempos de identificación utilizando el programa original (t_{orig}) y utilizando el programa modificado (t_{adapt}), así como la diferencia entre ambos tiempos ($\Delta t = t_{orig} - t_{adapt}$) y el porcentaje del tiempo original que representa esa diferencia de tiempos ($\Delta t (\%)$).

También se muestra el número de identificaciones realizadas utilizando el programa original (I_{orig}) y utilizando el programa con incremento de orden adaptativo (I_{adapt}), así como la reducción de identificaciones realizadas ($\Delta I = I_{orig} - I_{adapt}$).

Tabla 6: Ahorro de identificaciones ΔI y de tiempo Δt utilizando el método propuesto con incremento de orden adaptativo para la respuesta en frecuencia GaN5 con tolerancia de fase 0.5° .

Resp_Frec	I_{orig}	I_{adapt}	ΔI	$t_{orig}(s)$	$t_{adapt}(s)$	$\Delta t(s)$	$\Delta t(\%)$
GaN5	64	25	39	62.4	31.1	31.3	50.16 %

El ahorro de tiempo en la identificación es muy importante, ya que este se reduce en 31.3s; es decir, se evita un 50.16 % del tiempo inicial.

Se puede concluir que el método ha funcionado correctamente para una identificación larga, el ahorro de identificaciones es muy considerable y se reduce mucho el tiempo de ejecución.

3.4.4. Aplicación del incremento de orden adaptativo para la respuesta GaN5 con diferentes tolerancias de fase

Hasta ahora, se ha trabajado con una tolerancia de fase $\theta_{tolerancia} = 0.5^\circ$, pero es de gran interés analizar el funcionamiento del método propuesto para tolerancias de fase distintas, por ejemplo $\theta_{tolerancia} = 0.1^\circ$ y $\theta_{tolerancia} = 1.0^\circ$. Se sigue utilizando la respuesta GaN5 a modo de ejemplo.

Si se identifica la respuesta en frecuencia GaN5 mediante el programa original utilizando una tolerancia de fase de 0.1° , la identificación toma orden inicial 80 y realiza 82 identificaciones hasta llegar al orden final 242 utilizando un incremento de orden constante dos, y la identificación tarda 93.9s en realizarse.

En la Figura 13(a) se observa cómo todos los incrementos de orden se realizan de dos en dos en el programa original y en la Figura 13(b) se pueden observar los diferentes incrementos de orden realizados aplicando el método con incremento del orden adaptativo.

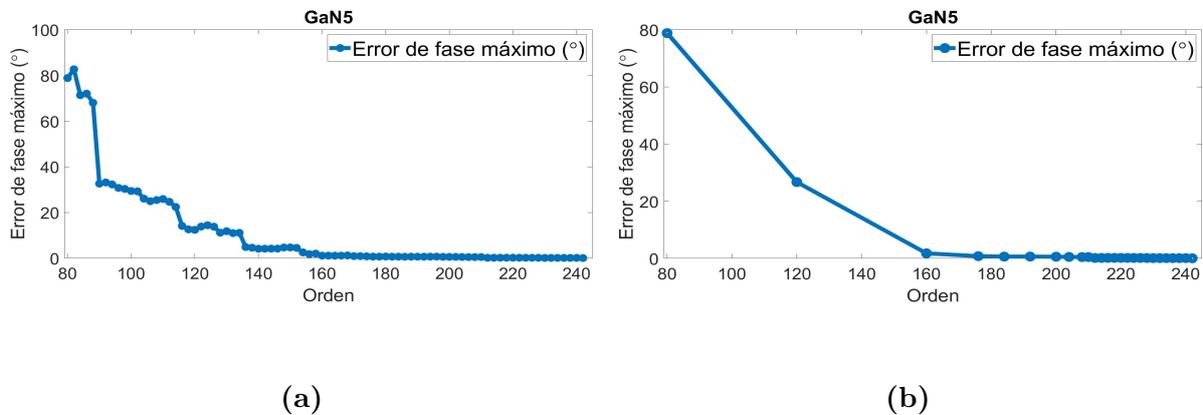


Figura 13: Evolución del proceso de identificación utilizando (a) el programa original y (b) el método propuesto con incremento de orden adaptativo para la respuesta GaN5 con tolerancia de fase 0.1° . Se obtiene un ahorro de tiempo del 56.55 % utilizando el método con incremento del orden adaptativo.

Se puede observar, al igual que cuando se utiliza tolerancia de fase 0.5° , la gran cantidad de identificaciones ahorradas en la mitad izquierda de la Figura 13(b), y cómo el ahorro es menor en el tramo final. Se puede observar que el margen de error utilizando el método propuesto es considerable también con tolerancia de fase 0.1° , ya que se realizan 18 identificaciones utilizando un incremento de orden 2 en el intervalo de orden 208 al orden final 242.

Por último, se analiza lo que sucede cuando se utiliza tolerancia de fase 1.0° . Si se identifica la respuesta en frecuencia GaN5 mediante el programa original utilizando una tolerancia de fase de 1.0° , la identificación toma orden inicial 80 y realiza 46 identificaciones hasta llegar al orden final 170 utilizando un incremento de orden constante dos, y la identificación tarda 38.3 s en realizarse.

En la Figura 14(a) se observa cómo todos los incrementos de orden se realizan de dos en dos en el programa original y en la Figura 14(b) se pueden observar los diferentes incrementos de orden realizados aplicando el método propuesto con incremento del orden adaptativo.

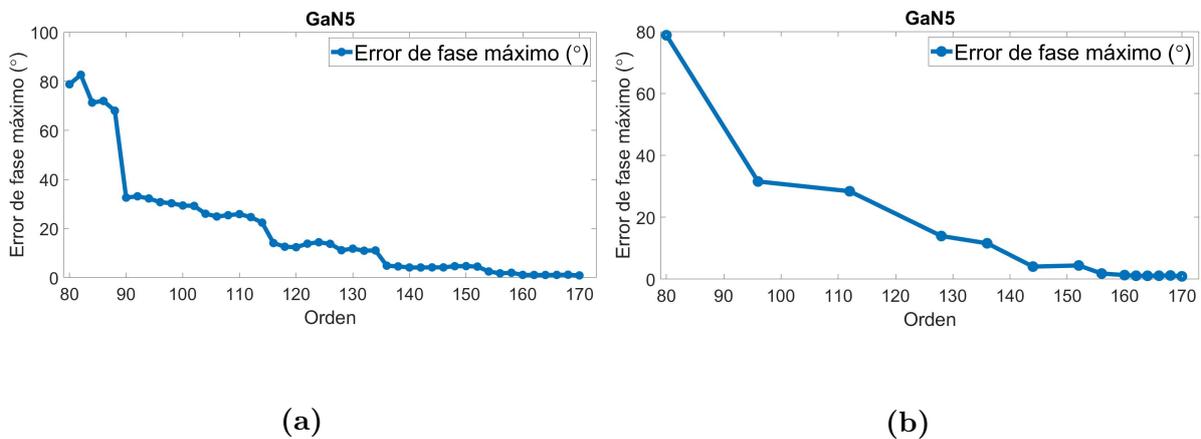


Figura 14: Evolución del proceso de identificación utilizando (a) el programa original y (b) el método propuesto con incremento de orden adaptativo para la respuesta GaN5 con tolerancia de fase 1.0° . Se obtiene un ahorro de tiempo del 63.18% utilizando el método con incremento del orden adaptativo.

Se puede observar también la cantidad de identificaciones ahorradas en la mitad izquierda de la Figura 14(b). En este caso, el margen de error es adecuado pero menor que en los casos con tolerancia 0.5° y tolerancia 0.1° , ya que se realizan 6 identificaciones con incremento de orden 2 desde orden 160 hasta el orden final 170.

En la Tabla 7 se muestra una comparativa entre la identificación utilizando el programa original y el método propuesto para la respuesta GaN5 con tolerancia de fase 0.1° y tolerancia de fase 1.0° .

Se muestran los tiempos de identificación utilizando el programa original (t_{orig}) y utilizando el programa modificado (t_{adapt}), así como la diferencia entre ambos tiempos ($\Delta t = t_{orig} - t_{adapt}$) y el porcentaje del tiempo original que representa esa diferencia de tiempos ($\Delta t (\%)$).

También se muestran las identificaciones realizadas utilizando el programa original (I_{orig})

y utilizando el programa modificado (I_{adapt}), así como la reducción de identificaciones realizadas ($\Delta I = I_{orig} - I_{adapt}$).

Tabla 7: Ahorro de identificaciones ΔI y de tiempo Δt utilizando el método propuesto con incremento de orden adaptativo para la respuesta en frecuencia GaN5 con tolerancias de fase 0.1° y 1.0° .

Resp-Frec	I_{orig}	I_{adapt}	ΔI	t_{orig}(s)	t_{adapt}(s)	Δt(s)	Δt(%)
GaN5 ($\theta_{tolerancia} = 0.1$)	82	26	56	93.9	40.8	53.1	56.55 %
GaN5 ($\theta_{tolerancia} = 1.0$)	46	14	32	38.3	14.1	24.2	63.18 %

El ahorro de tiempo en la identificación es muy importante, tanto para tolerancia 0.1° como para tolerancia 1.0° se ahorra más de la mitad del tiempo que se empleaba en realizar la identificación con el algoritmo original.

4. Validación exhaustiva del método propuesto con incremento de orden adaptativo

En este apartado se comprueba el funcionamiento del método con incremento de orden adaptativo que se ha propuesto para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado a lo largo del trabajo y para las tres tolerancias de fase que se han empleado en el ejemplo con la respuesta GaN5 (0.5° , 0.1° y 1.0°).

Se comparan de manera gráfica los procesos de identificación completos utilizando un incremento de orden adaptativo y en el programa original para algunas de las respuestas en frecuencia, y después se muestra el ahorro de tiempo obtenido para todas las respuestas.

Se comienza aplicando el método con tolerancia de fase 0.5° para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado.

En la Figura 15 se observa la identificación completa en el programa original (Figura 15(a)) y aplicando el método con incremento del orden adaptativo (Figura 15(b)) para la respuesta en frecuencia Sa31 con tolerancia de fase 0.5° .

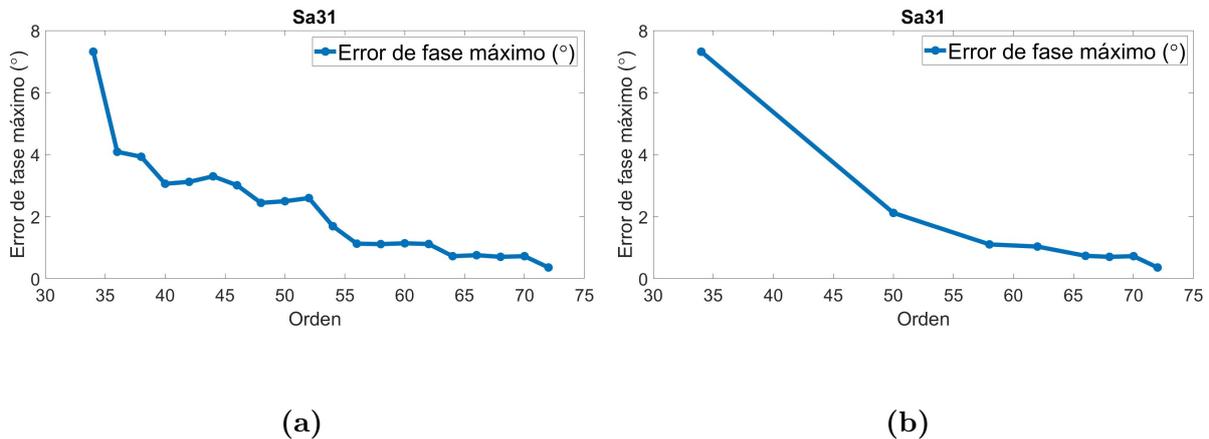


Figura 15: Evolución del proceso de identificación utilizando (a) el programa original y (b) el método propuesto con incremento de orden adaptativo para la respuesta Sa31 con tolerancia de fase 0.5° . Se obtiene un ahorro de tiempo del 52.87% utilizando el método con incremento del orden adaptativo.

En la Figura 16 se observa la identificación completa en el programa original (Figura 16(a)) y aplicando el método con incremento del orden adaptativo (Figura 16(b)) para la respuesta en frecuencia GaN1 con tolerancia de fase 0.1° .

Tanto en la Figura 15(b) como en la Figura 16(b) se puede observar el gran ahorro de identificaciones para ambas respuestas en frecuencia y cómo el margen de error es suficiente para garantizar la calidad de la identificación.

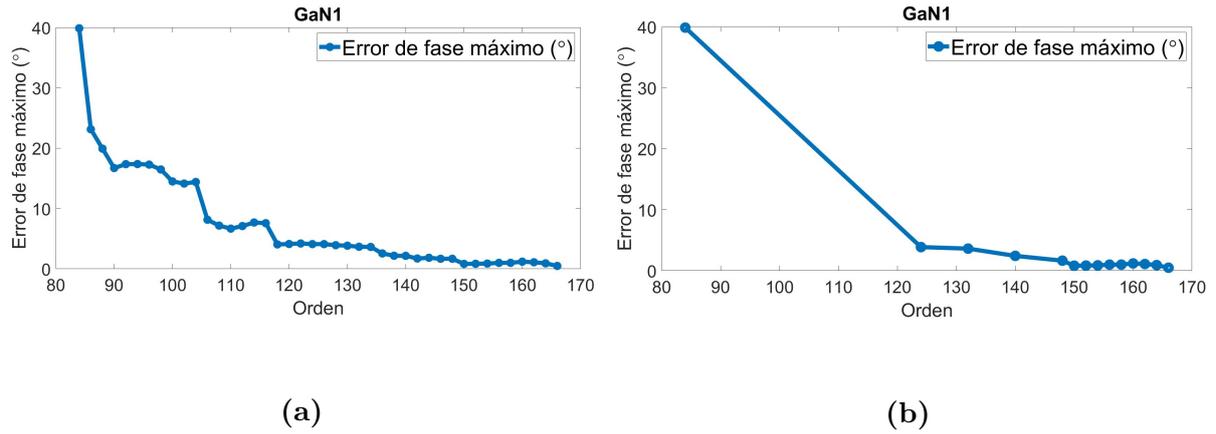


Figura 16: Evolución del proceso de identificación utilizando (a) el programa original y (b) el método propuesto con incremento de orden adaptativo para la respuesta GaN1 con tolerancia de fase 0.5° . Se obtiene un ahorro de tiempo del 30.06 % utilizando el método con incremento del orden adaptativo.

En la Tabla 9 se muestra la comparativa entre la identificación con el programa original y mediante el método propuesto con incremento de orden adaptativo para todas las respuestas en frecuencia que se han usado a lo largo del trabajo, utilizando una tolerancia de fase de 0.5° . Se muestran el número de identificaciones realizadas y el tiempo de ejecución total en cada caso.

Tabla 8: Ahorro de identificaciones ΔI y de tiempo Δt con incremento de orden adaptativo para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado con tolerancia de fase 0.5° .

Resp.Frec	I_{orig}	I_{adapt}	ΔI	$t_{orig}(s)$	$t_{adapt}(s)$	$\Delta t(s)$	$\Delta t(\%)$
Sa28	24	12	12	10.4	6.3	4.1	39.42 %
Sa30	25	14	11	10.6	7.1	3.5	33.02 %
Sa31	20	8	12	8.7	4.1	4.6	52.87 %
GaN1	42	14	28	34.6	24.2	10.4	30.06 %
GaN2	64	18	46	66.9	24.4	42.5	63.53 %
GaN3	21	6	15	7.9	2.7	5.2	65.82 %
GaN4	34	10	24	21.7	7.5	14.2	65.44 %
GaN5	64	25	39	62.4	31.1	31.3	50.16 %

Se puede observar que la reducción del tiempo de identificación aplicando el método con incremento de orden adaptativo es generalizada para todas las respuestas en frecuencia, consiguiéndose reducir en más de un 50 % para 5 de las 8 respuestas analizadas.

En la Figura 17 se representa este ahorro de tiempo para las diferentes respuestas en frecuencia. En azul se muestra el tiempo de identificación empleando el algoritmo original y en naranja el tiempo de identificación empleando el método con incremento de orden adaptativo.

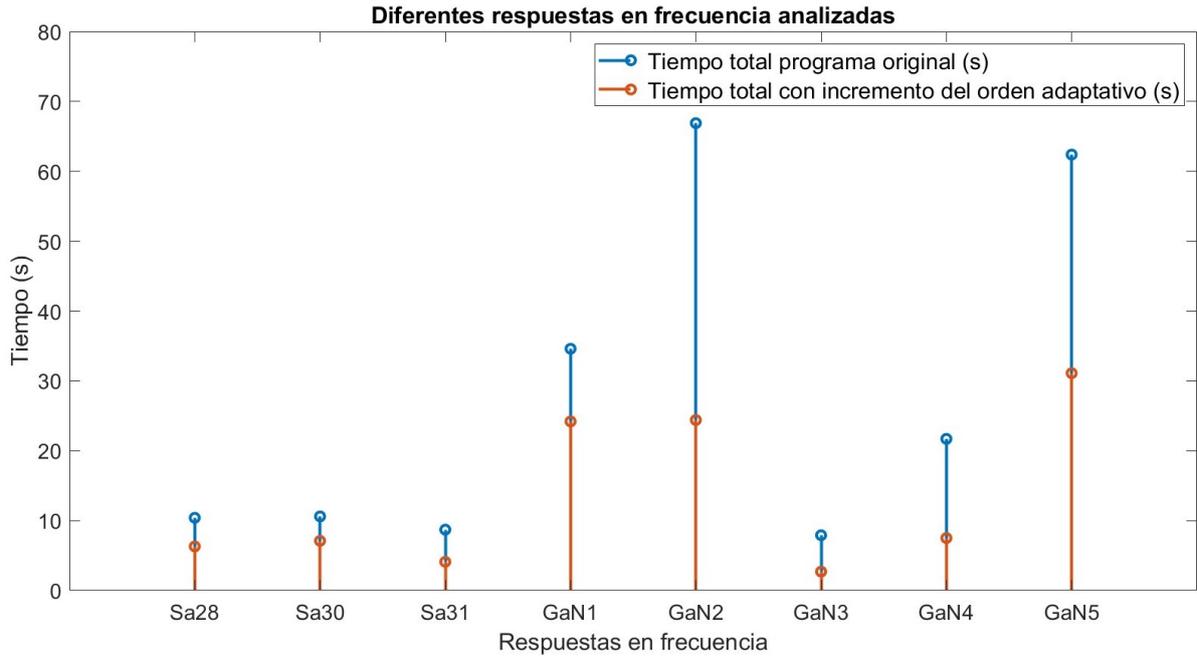


Figura 17: Ahorro de tiempo con incremento de orden adaptativo para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado con tolerancia de fase 0.5° .

Se puede observar que el ahorro de tiempo es muy importante, especialmente para las respuestas en frecuencia con identificaciones más largas, GaN2 y GaN5. El tiempo se reduce para todas las respuestas analizadas y las identificaciones se realizan correctamente, en todos los casos el orden final que toma la identificación es el primero para el que se cumple la condición de tolerancia de fase.

A continuación, se aplica el método con tolerancia de fase 0.1° para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado. Hay que tener en cuenta que para esta tolerancia de fase el orden inicial mínimo para aplicar el método es 60, por lo que solamente se ha aplicado a las respuestas que cumplen esa condición (GaN1, GaN2, GaN4, GaN5).

En la Figura 18 se observa la identificación completa en el programa original (Figura 18(a)) y aplicando el método con incremento del orden adaptativo (Figura 18(b)) para la respuesta en frecuencia GaN2 con tolerancia de fase 0.1° .

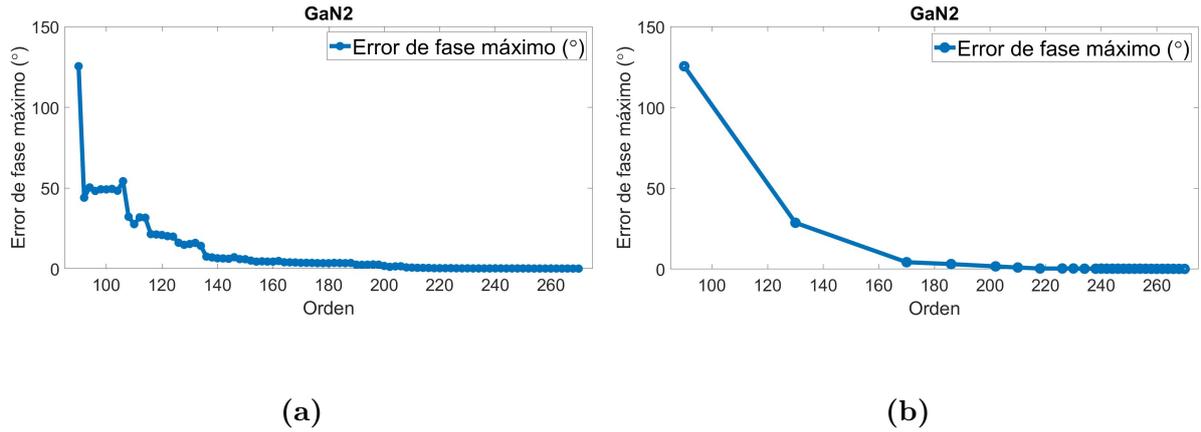


Figura 18: Evolución del proceso de identificación utilizando (a) el programa original y (b) el método propuesto con incremento de orden adaptativo para la respuesta GaN2 con tolerancia de fase 0.1° . Se obtiene un ahorro de tiempo del 57.49 % utilizando el método con incremento del orden adaptativo.

En la Figura 19 se observa la identificación completa en el programa original (Figura 19(a)) y aplicando el método con incremento del orden adaptativo (Figura 19(b)) para la respuesta en frecuencia GaN4 con tolerancia de fase 0.1° .

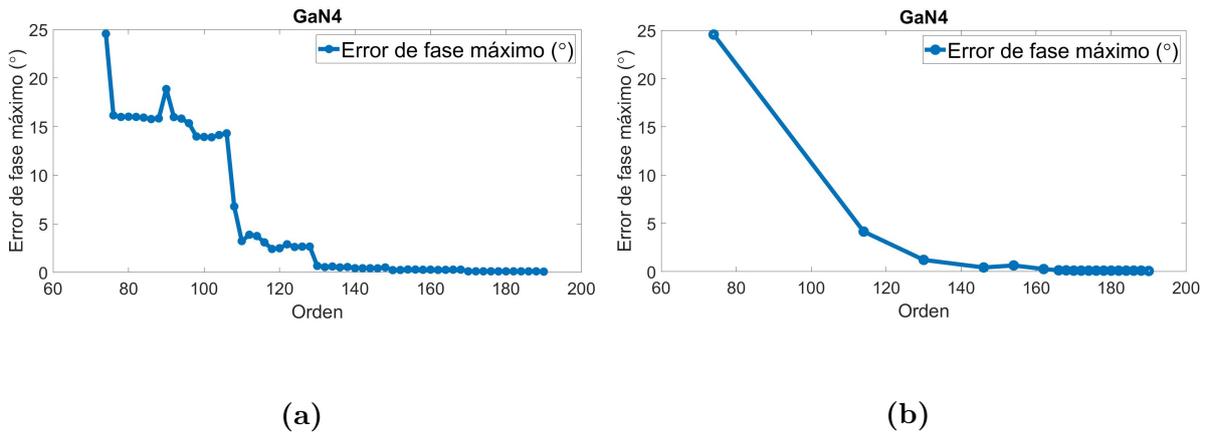


Figura 19: Evolución del proceso de identificación utilizando (a) el programa original y (b) el método propuesto con incremento de orden adaptativo para la respuesta GaN4 con tolerancia de fase 0.1° . Se obtiene un ahorro de tiempo del 56.94 % utilizando el método con incremento del orden adaptativo.

Tanto en la Figura 18(b) como en la Figura 19(b) se puede apreciar el gran ahorro de identificaciones para ambas respuestas en frecuencia y cómo el margen de error es suficiente para garantizar la calidad de la identificación, aunque es conservador para la respuesta en frecuencia GaN2.

En la Tabla 9 se muestra la comparativa entre la identificación con el programa original y mediante el método propuesto con incremento de orden adaptativo para todas las respuestas que tienen un orden inicial mayor que 60, utilizando una tolerancia de fase de 0.1° . Se muestran el número de identificaciones realizadas y el tiempo de ejecución total en cada caso.

Tabla 9: Ahorro de identificaciones ΔI y de tiempo Δt con incremento de orden adaptativo para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado con tolerancia de fase 0.1° .

Resp_Frec	I_{orig}	I_{adapt}	ΔI	$t_{orig}(s)$	$t_{adapt}(s)$	$\Delta t(s)$	$\Delta t(\%)$
GaN1	62	21	41	61.9	27.2	34.7	56.06 %
GaN2	91	27	64	116.9	49.7	67.2	57.49 %
GaN4	59	19	40	49.7	21.4	28.3	56.94 %
GaN5	82	26	56	93.9	40.8	53.1	56.55 %

Se puede observar que la reducción del tiempo de identificación aplicando el método con incremento de orden adaptativo es generalizada para todas las respuestas en frecuencia, consiguiéndose reducir en más de un 50 % todas las respuestas analizadas.

En la Figura 20 se representa este ahorro de tiempo para las diferentes respuestas en frecuencia. En azul se muestra el tiempo de identificación empleando el algoritmo original y en naranja el tiempo de identificación empleando el método con incremento de orden adaptativo.

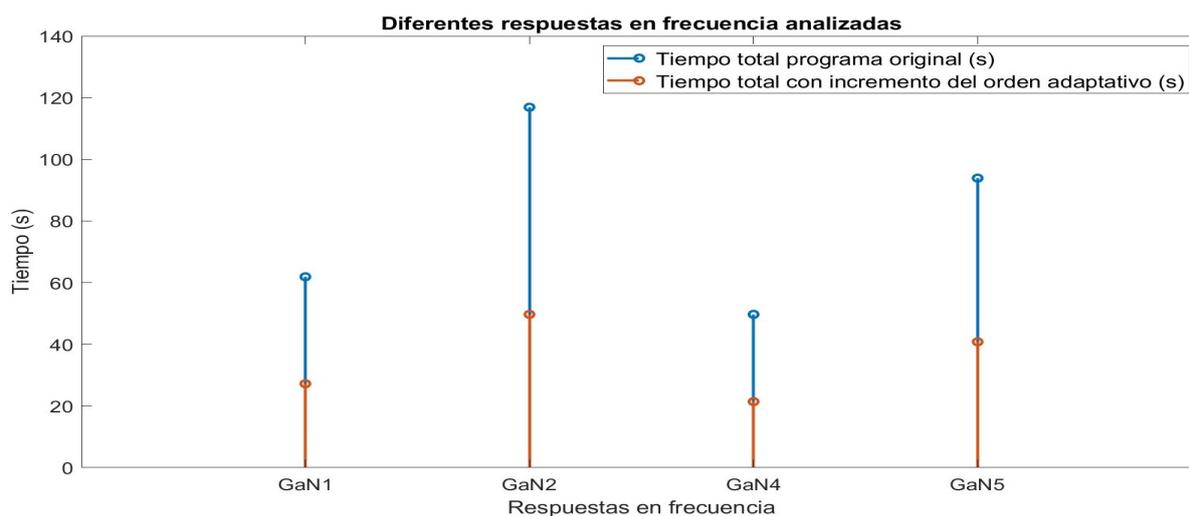


Figura 20: Ahorro de tiempo Δt con incremento de orden adaptativo para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado con tolerancia de fase 0.1° .

Se puede observar que el ahorro de tiempo es muy importante, especialmente para la respuesta en frecuencia GaN2. El tiempo se reduce para todas las respuestas analizadas y las identificaciones se realizan correctamente, en todos los casos el orden final que toma la identificación es el primero para el que se cumple la condición de tolerancia de fase.

Por último, se aplica el método con tolerancia de fase 1.0° para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado.

En la Figura 21 se observa la identificación completa en el programa original (Figura 21(a)) y aplicando el método con incremento del orden adaptativo (Figura 21(b)) para la respuesta en frecuencia Sa28 con tolerancia de fase 1.0° .

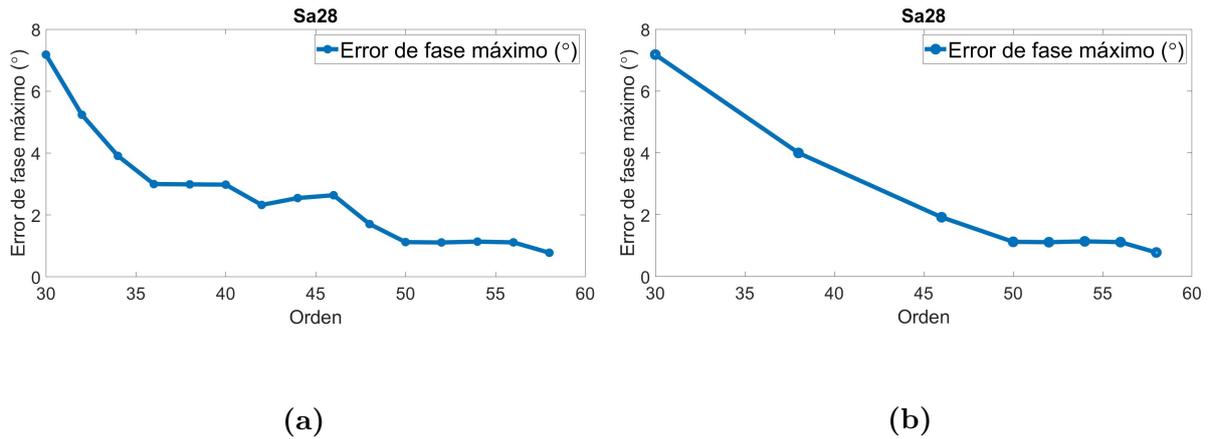


Figura 21: Evolución del proceso de identificación utilizando (a) el programa original y (b) el método propuesto con incremento de orden adaptativo para la respuesta Sa28 con tolerancia de fase 1.0° . Se obtiene un ahorro de tiempo del 40.00 % utilizando el método con incremento del orden adaptativo.

En la Figura 22 se observa la identificación completa en el programa original (Figura 22(a)) y aplicando el método con incremento del orden adaptativo (Figura 22(b)) para la respuesta en frecuencia GaN3 con tolerancia de fase 1.0° .

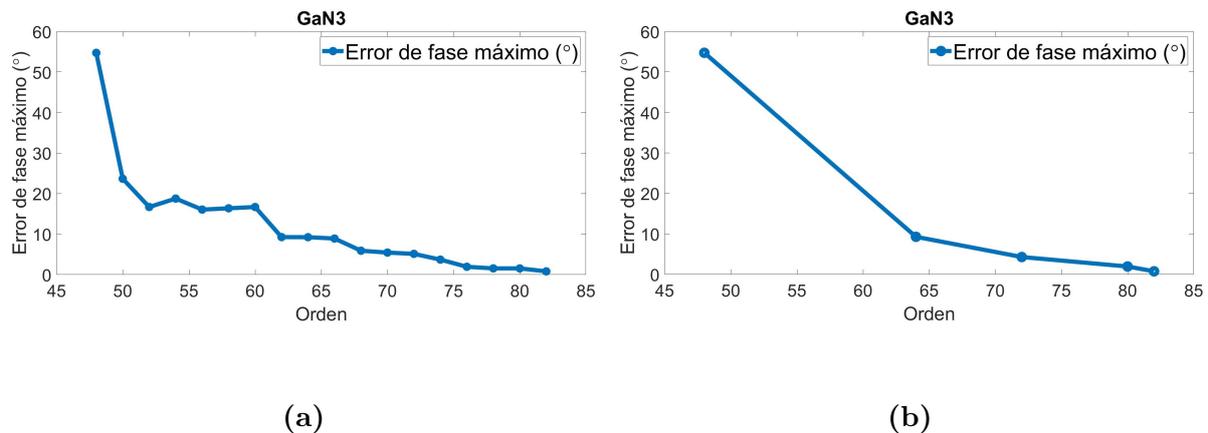


Figura 22: Evolución del proceso de identificación utilizando (a) el programa original y (b) el método propuesto con incremento de orden adaptativo (b) para la respuesta GaN3 con tolerancia de fase 1.0° . Se obtiene un ahorro de tiempo del 67.80 % utilizando el método con incremento del orden adaptativo.

Tanto en la Figura 21(b) como en la Figura 22(b) se puede observar el gran ahorro de identificaciones para ambas respuestas en frecuencia y cómo, aunque la identificación se realiza de manera correcta, el margen de error es algo ajustado en el caso de la respuesta GaN3.

En la Tabla 10 se muestra la comparativa entre la identificación con el programa original y mediante el método propuesto con incremento de orden adaptativo para todas las respuestas en frecuencia que se han usado a lo largo del trabajo, utilizando una tolerancia de fase de 1.0° . Se muestran el número de identificaciones realizadas y el tiempo de ejecución total en cada caso.

Tabla 10: Ahorro de identificaciones ΔI y de tiempo Δt con incremento de orden adaptativo para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado con tolerancia de fase 1.0° .

Resp_Frec	I_{orig}	I_{adapt}	ΔI	$t_{orig}(s)$	$t_{adapt}(s)$	$\Delta t(s)$	$\Delta t(\%)$
Sa28	15	8	7	5.5	3.3	2.2	40.00 %
Sa30	14	7	7	4.7	2.8	1.9	40.43 %
Sa31	16	8	8	6.5	3.9	2.6	40.00 %
GaN1	34	12	22	25.2	10.5	14.7	58.33 %
GaN2	60	23	37	58.6	28.9	29.7	50.68 %
GaN3	18	5	13	6.4	2.1	4.3	67.80 %
GaN4	29	11	18	17.5	7.6	9.9	56.57 %
GaN5	46	14	32	38.3	14.1	24.2	63.19 %

Se puede observar que la reducción del tiempo de identificación aplicando el método con incremento de orden adaptativo es generalizada para todas las respuestas en frecuencia, consiguiéndose reducir en más de un 50 % para 5 de las 8 respuestas analizadas.

En la Figura 23 se representa este ahorro de tiempo para las diferentes respuestas en frecuencia. En azul se muestra el tiempo de identificación empleando el algoritmo original y en naranja el tiempo de identificación empleando el método con incremento de orden adaptativo.

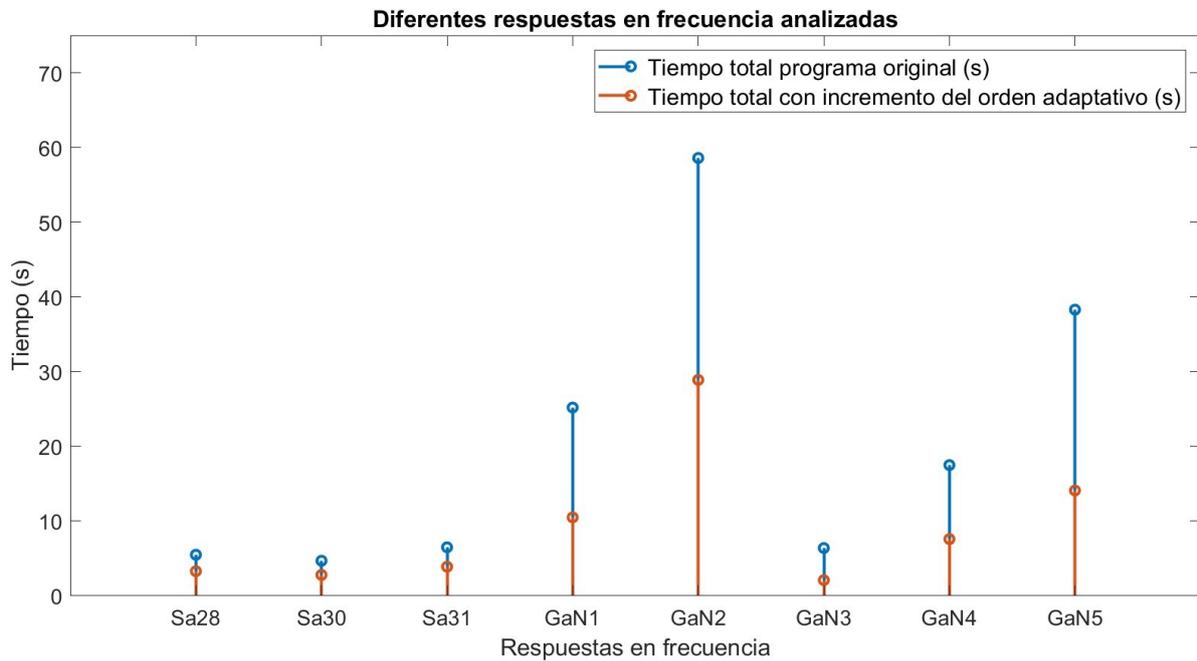


Figura 23: Ahorro de tiempo Δt con incremento de orden adaptativo para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado con tolerancia de fase 1.0° .

Se puede observar que el ahorro de tiempo es muy importante, especialmente para las respuestas en frecuencia con identificaciones más largas. El tiempo se reduce para todas

las respuestas analizadas y las identificaciones también se realizan correctamente con tolerancia de fase 1.0° .

5. Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se han creado varios algoritmos en Matlab para mejorar la eficiencia del estado del arte de la identificación polo-cero mediante Vector Fitting para el análisis de estabilidad de circuitos de alta frecuencia. En este último apartado se sintetizan los resultados obtenidos con los diferentes algoritmos propuestos, se señalan sus limitaciones y se proponen ideas para líneas de investigación futuras.

Los algoritmos propuestos en este Trabajo de Fin de Grado tratan de mejorar la eficiencia de la identificación polo-cero mediante Vector Fitting de dos maneras diferentes: reduciendo el tiempo de identificación de cada orden y realizando menos identificaciones hasta llegar al orden final para el que se cumple la condición de tolerancia de fase.

En primer lugar, se ha evaluado si una mejor elección de los polos iniciales condiciona el tiempo de identificación de cada orden. Para ello, se ha analizado el efecto de colocar los polos iniciales en las resonancias de la respuesta en frecuencia y de utilizar como polos iniciales los obtenidos mediante el método DACWIN. Tras realizar este proceso para varias respuestas en frecuencia, en ninguno de los casos se ha conseguido reducir el tiempo de identificación de cada orden, por lo que no se ha logrado mejorar la eficiencia de la identificación polo-cero variando la elección de los polos iniciales. Los resultados obtenidos indican que la selección de los polos iniciales equiespaciados a lo largo del rango de frecuencias de la respuesta, tal y como se propone en [16]-[18], es adecuada y que la elección de polos iniciales más cercanos a los verdaderos polos del sistema no es relevante para el ahorro de tiempo en la identificación.

En segundo lugar, se ha propuesto aumentar el incremento de orden para reducir el número de identificaciones realizadas. Se ha observado que aumentando el incremento de orden a un valor fijo existe el riesgo de over-modeling al realizar la identificación, por lo que se ha optado por implementar un método con incremento del orden adaptativo, que realiza incrementos de orden diferentes según la proximidad del error de fase máximo a la tolerancia de fase. El valor del error de fase máximo puede cambiar considerablemente incluso para órdenes próximos, por lo que para que el método sea más sólido y permita realizar incrementos de orden mayores se ha utilizado también la cercanía del error de fase medio a la tolerancia de fase como condición para variar el incremento de orden realizado.

Para todas las respuestas en frecuencia que se han analizado y con tolerancias de fase desde 0.1° hasta 1.0° la aplicación del método con incremento del orden adaptativo ha mejorado la eficiencia de la identificación, reduciéndose el tiempo de identificación en más del 50 % en varios de los casos más largos. Se ha comprobado que el orden final obtenido en todas las identificaciones es el primer orden para el que se cumple la condición de tolerancia de fase, asegurando así la calidad del análisis de estabilidad realizado.

Por tanto, mediante este método con incremento del orden adaptativo se ha logrado realizar una contribución beneficiosa para la mejora de la eficiencia del estado del arte de la identificación polo-cero mediante Vector Fitting. De todas formas, el método presenta alguna limitación, ya que para algunas de las respuestas con órdenes finales de identificación altos que se han analizado el margen de error del método es considerable, y esto provoca que, aunque el tiempo de identificación se reduzca, se realicen numerosas identificaciones de gran coste en el tramo final de la identificación.

En resumen, se ha logrado mejorar la eficiencia del estado del arte de la identificación

polo-cero mediante Vector Fitting, que era el objetivo de este trabajo. Para ello, se ha implementado un método con incremento del orden adaptativo que permite reducir el número de identificaciones realizadas sin comprometer la calidad del análisis de estabilidad realizado. En líneas de investigación futuras, sería de gran interés probar nuevas metodologías para tratar de mejorar aun más la eficiencia de la identificación polo-cero. Estas nuevas propuestas podrían analizar si aumentar y disminuir el número de iteraciones que realiza Vector Fitting para cada orden tiene algún efecto sobre el orden final y el tiempo de la identificación. También se podría plantear la implementación de un método con incremento del orden adaptativo en el que los nuevos polos se añadiesen en los puntos frecuenciales con mayor error de fase, y evaluar el efecto de esta propuesta sobre el tiempo de identificación de cada orden.

6. Bibliografía

- [1] A. Suárez and R. Quere, *Stability Analysis of Nonlinear Microwave Circuits*. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 2 ed., 2003.
- [2] A. Suárez, *Analysis and Design of Autonomous Microwave Circuits*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 1 ed., 2009.
- [3] J. M. Rollett, “Stability and Power-Gain Invariants of Linear Twoports,” *IRE Trans. Circuit Theory*, vol. 9, no. 1, pp. 29-32, 1962.
- [4] M. Ohtomo, “Proviso on the Unconditional Stability Criteria for Linear Twoport,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 43, no. 5, pp. 1197-1200, 1995.
- [5] R. W. Jackson, “Rollett Proviso in the Stability of Linear Microwave Circuits - A tutorial,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 3, pp. 993-1000, 2006.
- [6] D. Woods, “Reappraisal of the Unconditional Stability Criteria for Active 2-Port Networks in Terms of S Parameters,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 73-81, 1976.
- [7] A. Platzker, W. Struble, and K. T. Hetzler, “Instabilities Diagnosis and the Role of K in Microwave Circuits,” in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, (Atlanta, GA, USA), pp. 1185-1188, IEEE, June 1993.
- [8] W. Struble and A. Platzker, “A Rigorous Yet Simple Method for Determining Stability of Linear N-Port Networks,” in *15th Gall. Arsenide Integr. Circuit Symp. Tech. Dig.*, (San Jose, CA, USA), pp. 251-254, IEEE, Oct. 1993.
- [9] M. Ohtomo, “Stability Analysis and Numerical Simulation of Multidevice Amplifiers,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 41, no. 617, pp. 983-991, 1993.
- [10] V. Rizzoli and A. Lipparini, “General Stability Analysis of Periodic Steady-State Regimes in Nonlinear Microwave Circuits,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 33, no. 1, pp. 30-37, 1985.
- [11] J. Jugo, J. Portilla, A. Anakabe, A. Suarez and J.M. Collantes, “Closed-loop stability analysis of microwave amplifiers,” *Electronics Letters*, vol. 37, no. 4, pp. 226-228, 15 Feb 2001.
- [12] R. Pintelon and J. Schoukens, *System Identification: A Frequency Domain Approach*. New York, NY, USA: Wiley-IEEE Press, 2 ed., 2012.
- [13] A. Anakabe, N. Ayllon, J.M. Collantes, A. Mallet, G. Soubercaze-Pun and K. Narendra, “Automatic pole-zero identification for multivariable large-signal stability analysis of RF and microwave circuits,” in *40th Eur. Microw. Conf.*, (Paris, France), pp. 477-480, Sep. 2010.
- [14] “<https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.”
- [15] L. Mori, “Stability analysis of RF power amplifiers through MIMO pole-zero identification techniques,” Ph.D. dissertation, University of the Basque Country (UPV-EHU), 2019.
- [16] A. Semlyen and B. Gustavsen, “Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 3, pp. 1052-1061, 1999.

- [17] A. Semlyen and B. Gustavsen, "Vector Fitting by Pole Relocation for the State Equation Approximation of Nonrational Transfer Matrices," *Circuits, Syst. Signal Process.*, vol. 19, no. 6, pp. 549-566, 2000.
- [18] B. Gustavsen, "Improving the Pole Relocating Properties of Vector Fitting," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 3, pp. 1587-1592, 2006.
- [19] J.M. Collantes, L. Mori, A. Anakabe, N. Otegi, I. Lizarraga, N. Ayllón, F. Ramírez, V. Armengaud and G. Soubercaze-Pun, "Stability Analysis with Pole-Zero Identification: Unveiling the Critical Dynamics of Microwave Circuits," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 20, no. 7, pp. 36-54, Jul. 2019.
- [20] S. Sastry, *Nonlinear Systems: Analysis, Stability and Control*. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1 ed., 1999.
- [21] A. Suárez, "Check the Stability: Stability Analysis Methods for Microwave Circuits," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 16, no. 5, pp. 69-90, 2015.
- [22] Amcad Engineering, Application Note, *STAN Tool: A Unique solution for the Stability Analysis of RF & Microwave Circuits*, pp. 1-26, 2022.
- [23] "<https://cnes.fr/fr>."
- [24] "<http://www.amcad-engineering.com/>."
- [25] B. Salarieh and H.M.J. De Silva, "Review and comparison of frequency-domain curve-fitting techniques: Vector fitting, frequency-partitioning fitting, matrix pencil method and loewner matrix," *Electric Power Systems Research*, vol. 196, 2021.