



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

**DISEÑO DE UN MEDIDOR DE LINEALIDAD DE AMPLIFICADORES
BASADO EN AM VESTIGIAL PARA 6G.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniería en Telecomunicaciones

AUTORES: AYALA GUAMANGALLO STEVE ALEJANDRO
LUZÓN CASIGNIA ANDREA ALEXANDRA

TUTOR: MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA

Quito-Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Steve Alejandro Ayala Guamangallo con documento de identificación N° 1726701855 y Andrea Alexandra Luzón Casignia con documento de identificación N° 1726042177, manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 03 de agosto del 2023

Atentamente,



Steve Alejandro Ayala Guamangallo
1726701855



Andrea Alexandra Luzón Casignia
17260142177


**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Steve Alejandro Ayala Guamangallo con documento de identificación N° 1726701855 y Andrea Alexandra Luzón Casignia con documento de identificación N° 1726042177, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del artículo académico: “Diseño de un medidor de linealidad de amplificadores basado en un vestigial para 6G.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniería en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 03 de agosto del 2023

Atentamente,



Steve Alejandro Ayala Guamangallo
1726701855



Andrea Alexandra Luzón Casignia
17260142177

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Napoleón Tipán Simbaña con documento de identificación N° 1713583126, docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN MEDIDOR DE LINEALIDAD DE AMPLIFICADORES BASADO EN AM VESTIGIAL PARA 6G, realizado por Steve Alejandro Ayala Guamangallo con documento de identificación N°1726701855 y por Andrea Alexandra Luzón Casignia con documento de identificación N°1726042177, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 03 de agosto del año 2023

Atentamente,



Ing. Milton Napoleón Tipán Simbaña, MSc

1713583126

DEDICATORIA

En primer lugar, dedico este proyecto de investigación con todo mi amor y gratitud a mi abuelita Esperanza, quien siempre creyó en mí y me alentó a perseguir mis sueños. Su amor incondicional y sabios consejos fueron fundamentales para llegar hasta este punto, y su presencia ha sido una fuente constante de inspiración. Dedico también a mis padres, Fernando y Karina, quienes han sido mi mayor pilar en las circunstancias más difíciles. Su apoyo inquebrantable, comprensión y sacrificio han sido clave para superar obstáculos y alcanzar mis metas académicas. Sin ellos, este logro no habría sido posible

Steve Alejandro Ayala Guamangallo

Dedico el artículo académico a mis padres Pablo y Carmita, quienes me han apoyado en todas las facetas de mi vida, ya que sin ellos no hubiera llegado al lugar en el que estoy. Gracias por todo su esfuerzo y por siempre estar presentes y motivarme a alcanzar mis metas.

Andrea Alexandra Luzón Casignia

AGRADECIMIENTO

Quiero aprovechar esta oportunidad para expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me han acompañado y apoyado en este emocionante camino hacia la titulación. En primer lugar, a mi abuelita Esperanza y a mis padres, Fernando y Karina, quienes han sido mi mayor pilar en las circunstancias más difíciles.

Quiero mencionar a mi primo Pablo, quien ha sido mi fiel compañero desde los días de la escuela hasta la universidad. Juntos hemos compartido risas, desafíos y aprendizajes, y su presencia ha enriquecido mi experiencia académica y personal. Tampoco puedo dejar de agradecer a toda mi familia, cuyo apoyo y aliento han sido un estímulo constante. Cada uno de ustedes ha sido parte de este logro, y su presencia en mi vida ha sido fundamental para alcanzar la meta de obtener mi titulación.

Steve Alejandro Ayala Guamangallo

A Dios quién me ha guiado en todo mi camino y me ha dado fortaleza para cumplir mis objetivos.

A mis padres por todo su tiempo invertido y dedicación, a mi hermano por su apoyo, a mi prima Jhoanna por demostrarme lo lejos que se puede llegar cuando se desea alcanzar una meta. A mi novio Kevin por acompañarme en toda mi carrera universitaria y festejar mis logros como suyos.

Finalmente, a todos los profesores de la Universidad que me han hecho entusiasmar de haber decidido estudiar esta carrera, en especial al Ing. Milton Tipán por su apoyo en el desarrollo del proyecto de titulación.

Andrea Alexandra Luzón Casignia

DISEÑO DE UN MEDIDOR DE LINEALIDAD DE AMPLIFICADORES BASADO EN AM VESTIGIAL PARA 6G.

DESIGN OF A VESTIGIAL AM-BASED AMPLIFIER LINEARITY METER FOR 6G.

Andrea A. Luzón ¹, Steve A. Ayala ², Milton N. Tipán ³

Resumen

Este artículo propone un método para la medición de la linealidad de amplificadores de radio frecuencia basado en un modulador AM vestigial. Los métodos de función de transferencia y espectral fueron evaluados para el cálculo del OIP3 y comparados con el método tradicional de dos fuentes de radio frecuencia. Los resultados muestran un error relativo del 6% para el método de transferencia y 4.75% para el método espectral.

Palabras clave: Amplificador, Linealidad, Modulación AM, Espectro.

Abstract

This article proposes a method for measuring the linearity of radio frequency amplifiers based on a vestigial AM modulator. The transfer function and spectral methods were evaluated for the calculation of the OIP3 and compared with the traditional method of two sources of radio frequency. The results show a relative error of 6% for the transfer method and 4.75% for the spectral method.

Keywords: Amplifier, Linearity, Modulation AM, Spectrum.

¹Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: aluzonc@est.ups.edu.ec

²Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: sayalag@est.ups.edu.ec

³Carrera de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, e-mail: mtipans@ups.edu.ec

1. Introducción

En los sistemas de comunicación modernos, la complejidad de las modulaciones a altas frecuencias y la amplificación de señales requieren recursos más exigentes, lo que ha llevado al desarrollo de tecnologías más avanzadas, como la tecnología de sexta generación (6G). En este contexto, un aspecto crítico es mejorar la linealidad de los amplificadores de radiofrecuencia (RF) para optimizar el rendimiento de estos sistemas [1]. El problema de la linealidad en los amplificadores RF surge de la necesidad de garantizar una cantidad adecuada de señal, minimizar la interferencia en los sistemas de comunicación y reducir el consumo de corriente continua [2]. La linealidad es fundamental para evitar distorsiones no deseadas en la señal recibida, lo que puede provocar una degradación significativa del rendimiento del sistema debido a distorsiones considerables en la señal transmitida [3].

A lo largo de los años, se han probado diferentes métodos para abordar este problema, pero su implementación resulta costosa y compleja, especialmente al manejar frecuencias altas, lo que los hace poco apropiados para la aplicación actual. Recientemente, surgió una propuesta que utiliza un enfoque tradicional para caracterizar la linealidad empleando una prueba de dos tonos, en esta prueba se alimenta al receptor con dos niveles iguales de señales de prueba de RF de onda continua (CW) a frecuencias f_1 y f_2 en la banda operativa, que tenía buenos.

Este artículo introduce una topología en SystemVue basada en una modulación AM vestigial, lo que permite reducir el alto costo y consumo de energía asociados con la caracterización de la linealidad. El enfoque en la modulación AM vestigial proporciona una solución menos compleja y más económica. Además, el sistema trabaja con una banda lateral modificable y un filtro, teniendo en cuenta el comportamiento del modulador. Se utiliza el amplificador ADL7003 que presenta fuentes oscilantes en potencia, lo que permite al amplificador trabajar a una frecuencia de 80 GHz. El funcionamiento y la linealidad del amplificador son verificados en este artículo, con la expectativa de lograr un aumento en la eficiencia y ganancia de transmisión.

En el siguiente apartado, se presentan los métodos de modulación con sus diferentes caracterizaciones, detallando la simulación propuesta para medir el punto de intermodulación IP3 y verificar el rendimiento del método. Finalmente, se muestran los resultados de las medidas realizadas para el amplificador seleccionado, considerando la frecuencia de 80 GHz, compuesta por dos tonos frecuenciales tradicionales y una señal modulada en AM vestigial.

2. Métodos

2.1. Linealidad del amplificador

El producto de intermodulación de tercer orden (Intermodulation Product Third, IP3), es un parámetro utilizado en la caracterización de la linealidad de un amplificador. Indica el nivel de potencia de entrada en el que la distorsión armónica y la intermodulación no lineal comienzan a ser significativas en comparación con la señal de entrada original. [4]. El IP3 se expresa en unidades de potencia, generalmente en dBm. Un IP3 más alto indica una mejor linealidad del amplificador, ya que puede manejar niveles de potencia más altos antes de que aparezca la distorsión no lineal.

El IP3 se refiere al nivel de potencia de entrada en el que la potencia de la tercera armónica generada (f_3) es igual a la potencia de la resta de dos señales de frecuencia fundamental ($2f_1 - f_2$), asumiendo que f_1 y f_2 son frecuencias de entrada y $f_1 > f_2$ como se observa en la Figura 1. En este punto, la distorsión no lineal y la intermodulación comienzan a introducirse y la respuesta del amplificador ya no es lineal. Es importante tener en cuenta que el ancho de banda (BW) o la separación entre las frecuencias en el sistema deben ser considerados según las especificaciones proporcionadas por el fabricante. [5].

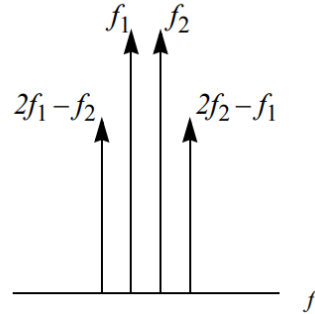


Figura 1. Cálculo de la frecuencia de intermodulación para IP3.

Para calcular el punto IP3 se pueden usar el método de la curva de transferencia de potencia y el método espectral. En el primero, se varía la potencia de entrada y se mide la potencia de salida de una de dos señales senoidales ingresadas con la misma potencia y frecuencias distintas dentro del rango de operación del amplificador, cuando aparecen frecuencias de intermodulación también son medidas para realizar un gráfico de transferencia de estas, como se muestra en la Figura 2, se extrapola la parte lineal de cada una de estas curvas generando un punto de intersección que representa el punto IP3 cuyas coordenadas son la potencia de entrada del punto IP3 (IIP3) y y la

potencia de salida del punto IP3 (OIP3).

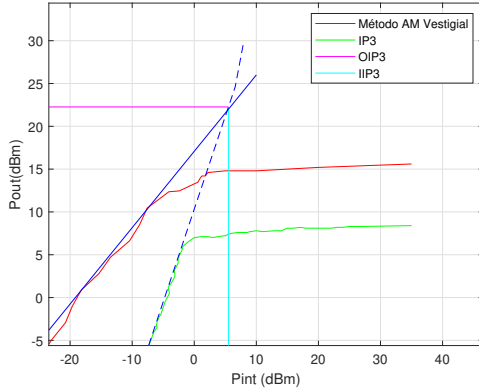


Figura 2. Función de transferencia para IP3.

En el segundo, se usa el espectro a la salida del amplificador como en la Figura 1, partir de los datos de las potencias de entrada y salida de las señales, se utiliza la Ecuación 1 para calcular el valor de OIP3 del amplificador [5].

$$OIP3 = P_{int} + \frac{P_{int} - P_{out}}{2} \quad (1)$$

Donde: P_{int} es la potencia de entrada de la señal en dBm y P_{out} representa la potencia de salida de la intermodulación de tercer orden en dBm

2.2. Modulador AM vestigial

Un modulador de Banda Lateral Vestigial (Vestigial Sideband Modulation, VSB) se encuentra en la transmisión de señales para televisión en la banda de VHF y UHF. La modulación VSB elimina de manera parcial las bandas laterales inferior o superior donde se almacena información redundante. Este modulador es muy aplicado por las ventajas que brinda en la transmisión de señales para simulación teniendo en cuenta que brinda una alta calidad con un ancho de banda muy limitado de esta manera permitiendo la transmisión de múltiples señales por el mismo canal. [5].

Para la modulación en amplitud toda la potencia es transmitida por banda lateral o vestigio de la otra banda lateral. Para altas frecuencias se transmite en una sola banda lateral alcanzado como máximo una demodulación de 50% y presentando menores amplitudes con respecto a las bajas frecuencias. Para eliminar una de las bandas laterales o parte de ellas para VSB se realiza mediante el uso de un filtro vestigial. Antes de

la aplicación del filtro es necesario realizar un traslado de la frecuencia central. [6].

3. Configuración del sistema

El proyecto se llevó a cabo utilizando el software SystemVue, en su versión 2020. En primer lugar, se realizó un análisis de la linealidad del amplificador ADL7003, el cual opera en un rango de frecuencia de 50 a 95 GHz, frecuencias que serán utilizadas en la convergencia de 5G a 6G [7]. Para poder incorporar los datos del amplificador en SystemVue, se descargaron los parámetros correspondientes desde la página del fabricante, Analog Devices Inc., en formato de archivos .s2p, los cuales son compatibles con el software. La Figura 3 muestra el esquemático del amplificador para radio frecuencia de SystemVue.

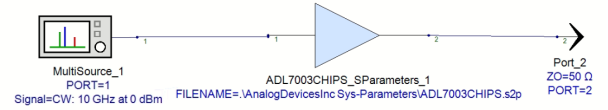


Figura 3. Configuración del amplificador ADL7003.

Las características principales el amplificador se resumen en la Tabla 1

Tabla 1. Parámetros del amplificador ADL7003

Parámetro	Valor
Frecuencia	50 GHz a 95 GHz
Ganancia	14 dB
Figura de ruido	5dB
Potencia de saturación	18 dBm
Output IP3	21 dBm
Input IP3	6 dBm
Ganancia	14 dB

Un sistema para la medición de la linealidad de un amplificador fue implementado en simulación donde se configuró el modelo tradicional, el cual se compone de dos generadores de señales que operan a diferentes frecuencias. Uno de los generadores senoidales se configuró a una frecuencia de 80 GHz, mientras que el otro generó una señal senoidal a una frecuencia ligeramente más alta, específicamente a 80.001 GHz; es decir con un ancho de banda de 1 MHz elegido como sugiere el fabricante. [7]

La Figura 4, muestra la configuración en SystemVue en modo sistema, donde R1 representa el amplificador en el esquemático RF que es llamado para su simulación.

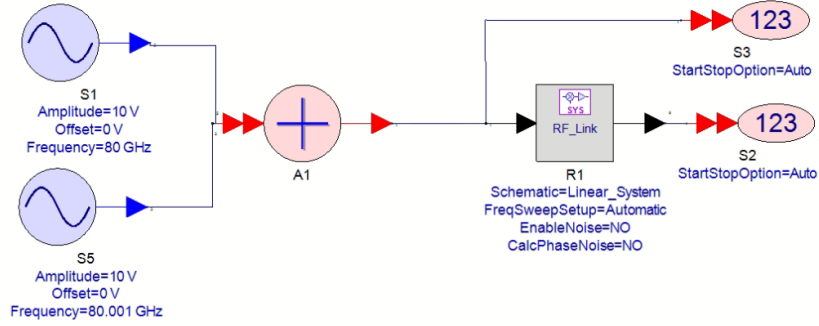


Figura 4. Configuración del método IP3 tradicional.

En segundo lugar, se configuró un modulador AM SSB, el cual operó al igual que con el método tradicional a las frecuencias de 80 GHz y 80.001 GHz.

Además, se implementó un filtro F1 vestigial en el sistema para obtener una modulación AM vestigial, la Figura 5 muestra la implementación en SystemVue.

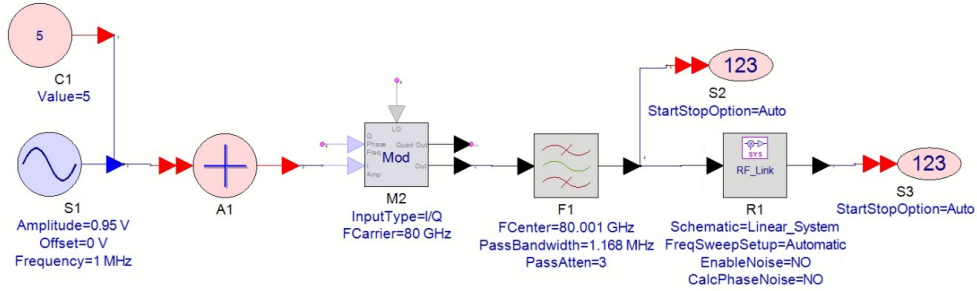
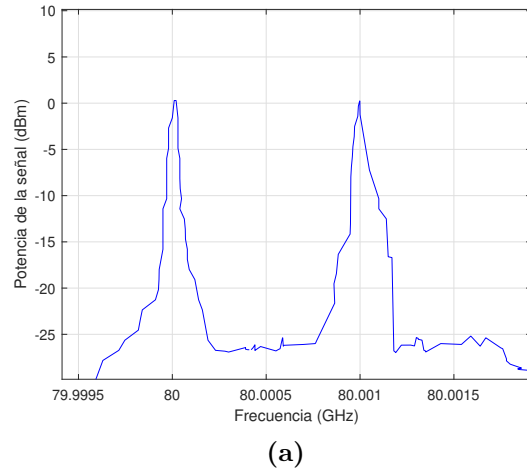


Figura 5. Configuración del método modulador AM vestigial.

4. Resultados y Discusión

La ganancia de amplificación en la zona lineal es realizado para el método tradicional, Para ello se usan los espectros de las señales de entrada y de salida del amplificador. En la Figura 6, se observa una ganancia aproximadamente de 10 dBm cuando la potencia de entrada de las señales es de 0dBm, lo que corrobora el funcionamiento lineal del amplificador según los datos proporcionados por el fabricante. Luego, se realizó el mismo procedimiento para el modulador AM vestigial. Se observó que en este método el sistema tuvo un impacto positivo en la calidad de la señal transmitida. El filtro butterworth permitió limitar una de las bandas laterales mientras atenúa la otra al piso de la señal transmitida que en este caso es de -31.3 dbm que se considera obsoleta, lo que resultó en una transmisión más eficiente y una mejor separación entre las bandas laterales como se observa en la Figura 9. Esto se tradujo en una mayor capacidad de rechazo de interferencias, aprovechando las capacidades del filtro Butterworth.



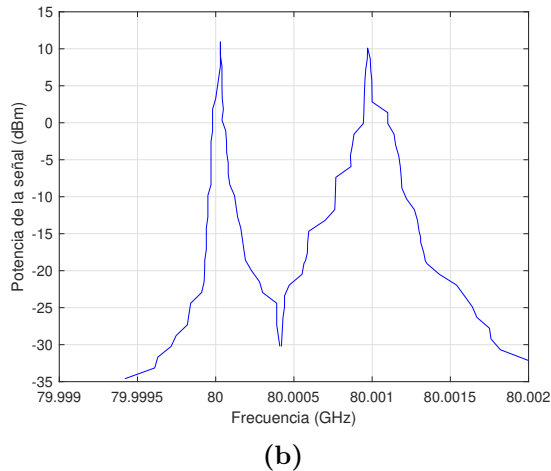


Figura 6. Espectro de potencia del método tradicional: (a) ante y (b) después del amplificador.

Al igual que con el método tradicional, se realiza una comparación entre el espectro de la señal antes de pasar por el amplificador Figura 7a, que se encuentra a una potencia de 0 dBm, y la señal de salida 7b que es prácticamente idéntica al espectro de la señal de entrada, pero amplificada aproximadamente hasta 15 dBm teniendo una diferencia de alrededor de 5dBm más en comparación con el método tradicional.

La diferencia en la ganancia se da porque en la modulación AM vestigial se preserva la mayor parte de la información de amplitud en la señal modulada, mientras que se elimina o reduce la parte envolvente que se encuentra cerca de la frecuencia portadora. Esto resulta en una transmisión más eficiente en términos de ancho de banda, utilizado lo que permite una mayor cantidad de información transmitida por ende mejora la calidad de la señal recibida y aumenta la ganancia de 0 dbm a 15 dbm en comparación con el método tradicional que su ganancia es de 10 dbm, que se puede observar en la Figura 9 en comparación con el método anterior que tiene la Figura 7 [8].

4.1. Medida de la linealidad

La linealidad del amplificador fue medida usando el método de AM vestigial, con el fin de compararlo con los valores dados por el fabricante los cuales son medidos usando el método tradicional. En primer lugar, se usó el método de función de transferencia para lo cual, se varió la potencia de entrada P_{in} desde -25 dBm hasta 35 dBm para encontrar su función de transferencia y ubicar los sectores de linealidad y no linealidad variando como se observa en la Figura 8. Se aprecia que con el método del modulador AM vestigial la potencia de saturación del amplificador está alrededor de 15dBm y el IP3 satura aproximadamente a 7dBm. Además, se observa que el punto de intercepción de

tercer orden es el punto donde la curva de P_{in} vs P_{out} de la potencia de señal se iguala a la potencia del producto de tercer orden; la potencia de entrada en este punto es 5.55 dBm ($IIP3$) y la de salida es 22.26 dBm ($OIP3$) [9].

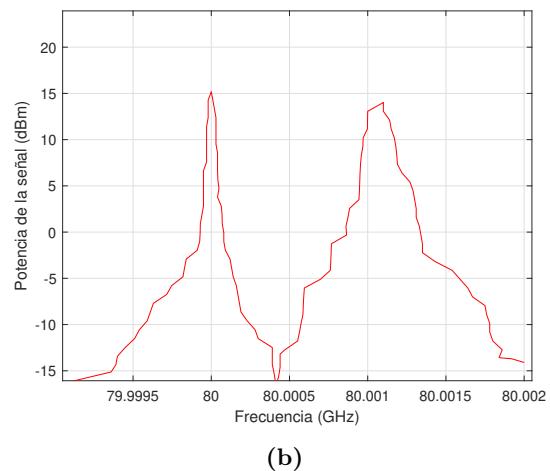
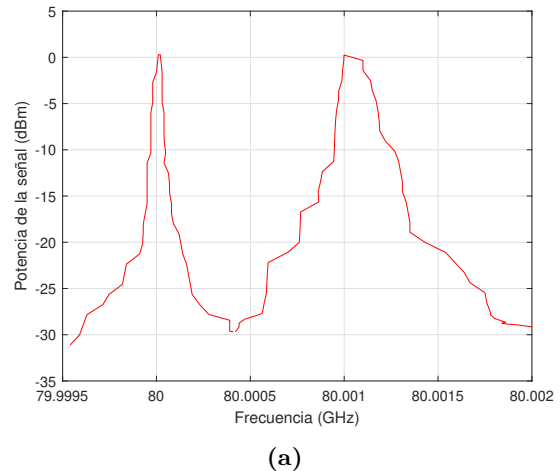


Figura 7. Espectro de potencia del modulador AM vestigial antes (a) y después (b) del amplificador.

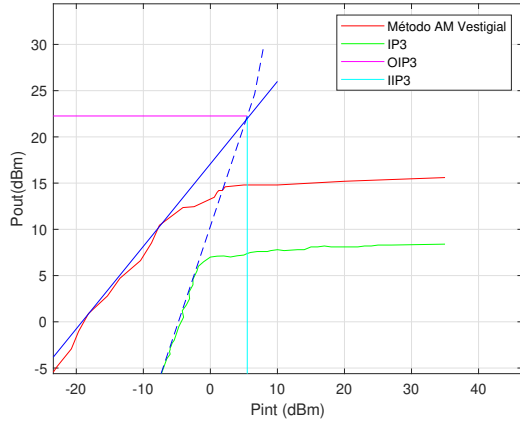


Figura 8. Función de transferencia P_{int} vs P_{out} y punto de intersección IP3.

Entonces, se calcula el error relativo porcentual con los valores encontrados y comparado con los valores del datasheet del amplificador ADL7003 [7]. Se obtuvo un error porcentual de 11% y 6% para el IIP3 y OIP3 respectivamente. En segundo lugar, se usó el método espectral para medir la linealidad para ello se procedió a variar la potencia de entrada hasta llegar a 15 dBm ya que a partir de este valor el amplificador deja de ser lineal a tal punto que aparece la potencia de los productos de intermodulación de tercer orden, como se muestra la Figura 9.

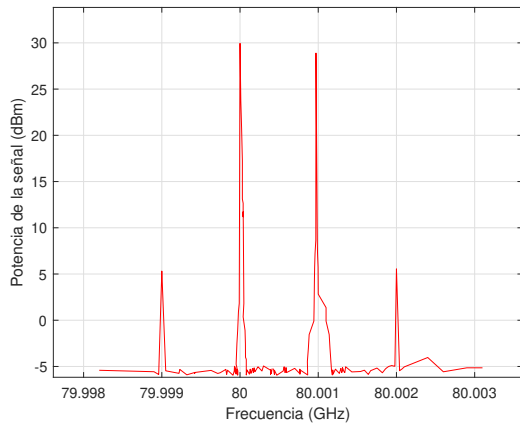


Figura 9. Espectro de potencia del modulador AM vestigial con intermodulación de tercer orden (IP3)

El espectro muestra que las potencias de las señales entrantes no son iguales, característica que indica el funcionamiento adecuado del modulador vestigial, por lo tanto, las potencias de los espectros de las señales de intermodulación de tercer orden son también diferentes con valores de 5 dBm para la intermodulación de la izquierda y de 6 dBm para la derecha. Para obtener

el IP3 se usa la Ecuación 1, se toma en cuenta la intermodulación izquierda y una P_{int} de 15 dBm y una P_{out} de 5 dBm obteniendo como resultado un OIP3 de 20 dBm, lo que da como resultado un error relativo porcentual de 4.75%.

5. Conclusiones

En conclusión, se ha propuesto un método de medición de linealidad basado en la modulación AM vestigial, este enfoque demostró obtener errores menores al 6% en la medición del Punto de Intermodulación de Tercer Orden (OIP3) en comparación con los valores proporcionados por el datasheet y obtenidos mediante el método tradicional. Esta aproximación permitió obtener mediciones bastante precisas y aceptables de los parámetros, como se observaron en la Figura 7 y en la Figura 9 donde la ganancia con el método tradicional es de 10 dBm y con el método propuesto es de 15 dBm; además de reducir significativamente los costos en comparación con el método tradicional, ya que no se requerían dos generadores de altas frecuencias para las pruebas.

Si bien se lograron resultados prometedores, es importante destacar que aún existen áreas de mejora para futuros trabajos. Se debe seguir investigando y refinando la tolerancia del método para obtener mediciones aún más precisas y confiables. Con una mayor mejora en la tolerancia, este enfoque podría consolidarse como una alternativa efectiva y económica para la medición de linealidad en amplificadores de radiofrecuencia, abriendo oportunidades para su aplicación en sistemas de comunicación más exigentes, como la tecnología 6G.

Referencias

- [1] A. S. Rodríguez, F. R. Terán, and M. P. Lobete, "Sistemas de radiofrecuencia," 2018 [Online]. Available: <https://ocw.unican.es/tema03.pdf>.
- [2] "Improve two-tone, third-order intermodulation testing," 2018.
- [3] B. Keith, "2toneimd," 2021.
- [4] A. B. Kokhanov, S. V. Yemelianov, and Y. V. Derevyagin, "Single sideband hartley amplitude modulation," *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 63, pp. 574–585, 11 2020.
- [5] K. S. Kundert, "The designer's guide community downloaded from www.designers-guide.org accurate and rapid measurement of ip 2 and ip 3," 2019. [Online]. Available: www.designers-guide.org.

- [6] M. D. Santos, “Vestigial sideband modulation (modulación de amplitud/modulación de fase/modulación de banda lateral vestigial am/pm/vsb),” 2023.
- [7] A. Devices, “Adl7003 (rev. 0),” 4 2017. [Online]. Available: www.analog.com.
- [8] X. Zhang, C. Zhang, C. Chen, W. Jin, X. Zhong, and K. Qiu, “Digital chromatic dispersion pre-management for ssb modulation direct-detection optical transmission systems,” *Optics Communications*, vol. 427, pp. 551–556, 11 2018.
- [9] C. Jose.M, “Rf l band amplifier design using qucs studio,” 2019.