

SÍNTESIS Y SIMULACIÓN DE FILTROS ACTIVOS USANDO UN SOLO TRANSISTOR EN TECNOLOGÍA CMOS

SYNTHESIS AND ACTIVE FILTERS SIMULATION USING A TRANSISTOR IN CMOS TECHNOLOGY

Artículo de investigación

Vázquez, Lyzette

UVP Universidad del Valle de Puebla

lyzettevazquez99@gmail.com

ORCID: 0009-0000-8891-0743

Recibido el 2 de febrero de 2024. Aceptado el 1 de marzo de 2024. Publicado el 30 de junio de 2024.

Reseña del Autor

Innovadora en el área de electrónica, desarrolladora en robótica, con intereses en IA y además enfocada laboralmente en el área de almacenamiento y respaldo de datos para la protección de diferentes compañías. Con enfoque exploratorio a las nuevas tecnologías que muestran autenticidad en contribuir el conocimiento, accesibilidad y sobre todo que sea aplicable en la vida cotidiana. Por lo que ha participado en el 9no. Congreso de Ingeniería Verde de Sustentabilidad e Innovación

en la Universidad del Valle de Puebla, así como también asistió y obtuvo 1er. Lugar en el concurso de Sumobot de la misma institución.

Resumen

México presenta una gran dependencia del suministro energético basado en hidrocarburos, lo cual impacta seriamente el medio ambiente. Aunado a lo anterior, dicha dependencia se ha exponenciado, ya que el consumo energético ha incrementado de manera alarmante por el uso de múltiples dispositivos electrónicos por persona. Una posible solución, mas no factible, es reducir el número de sistemas electrónicos por persona y el número de servicios que estos ofrecen. Sin embargo, esto es prohibitivo para el mercado y va en contra de las tendencias que imponen los usuarios, donde más es mejor.

Por lo antes mencionado, una solución permisible es reducir el consumo energético de dichos dispositivos electrónicos. Al analizar los diferentes sistemas electrónicos, se puede observar que el filtro analógico es uno de los bloques que más se usan en la electrónica y a su vez el procesamiento de señales. Por esta razón, en este trabajo se presenta el modelado matemático, síntesis, diseño y simulación de filtros pasa-baja, pasa-alta, pasa-banda y rechaza-banda que usan un solo transistor, lo cual reduce el consumo de potencia de este sistema, ya que solo existe una trayectoria de corriente para energizar el circuito.

Las arquitecturas de los filtros propuestos se limitan a usar el transistor MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) como una red de cuatro puertos, donde un puerto es usado como referencia y los puertos restantes son usados como nodos donde se colocan diferentes elementos pasivos. Para validar las arquitecturas de filtrado propuestas se seleccionaron algunas estructuras para su implementación en la banda de trabajo de los 910 MHz.

Palabras clave: Energía eléctrica, Circuito electrónico, Transistor, Modelo Matemático, Diseño.

Abstract

Mexico is heavily dependent on hydrocarbon-based energy supply, which seriously impacts the environment. In addition to the above, said dependency has increased, since energy consumption has grown alarmingly due to the use of multiple electronic devices per person. A possible solution, but not feasible, is to reduce the number of electronic systems per person and the number of services they offer. However, this is prohibitive for the market and goes against the trends imposed by users, where more is better.

Due to the aforementioned, a permissible solution is to reduce the energy consumption of said electronic devices. When analyzing the different electronic systems, it can be seen that the analog filter is one of the most used blocks in electronics and signal processing. For this reason, this paper presents the mathematical modeling, synthesis, design and simulation of low-pass, high-pass, band-pass and band-stop filters that use a single transistor which reduces the power consumption of this system, since there is only one current path to energize the circuit.

The architectures of the proposed filters are limited to using the MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) transistor as a four-port network, where one port is used as a reference and the remaining ports are used as nodes where different passive elements are placed. To validate the proposed filtering architectures, some structures were selected for their implementation in the 910 MHz working band.

Keywords: Electric energy, Electronic circuit, Transistor, Mathematical model, Design.

Introducción

Las señales contienen información fundamental con base en el medio en el que se esté transmitiendo, además de considerar la distancia y el tipo, ya sea análogo o digital. Estas son variables eléctricas que en el caso de las analógicas evolucionan en el tiempo de manera continua hacia alguna variable física, al estar en corriente, tensión o carga. Pero con las señales digitales se alternan en el tiempo y amplitud, con un código de símbolos que son entre 0 y 1.

De manera que, para adquirir estas variables, se depende de un sistema de instrumentación para que se procesen correctamente, se puede basar en la estructura de la Figura 1. El primer paso es la identificación de los tipos de variables, después se determinan los sensores necesarios para la adquisición automática de los datos. Posteriormente se amplifica y elimina la mayor cantidad de ruido con la ayuda de amplificadores operacionales (OpAmps), transistores y elementos pasivos, los cuales en conjunto tienen estructuras de filtrado. A su vez, se procede con la conversión analógica/digital (ADC por sus siglas en inglés) para finalizar con la implementación de la interfaz, la cual se utiliza para la interpretación de dichas señales por parte del usuario.

Figura 1.

Bloques básicos que conforman un sistema de instrumentación



Es decir que estas estructuras mejor conocidas como filtros se definen como circuitos selectivos que permiten el paso de algunas frecuencias de acuerdo al tipo, ya sea pasa bajas, pasa altas, pasa banda o rechaza banda. A su vez estos se clasifican en Activos y Pasivos; para los Filtros Pasivos, están compuestos solo por resistencias, capacitores e inductores, mientras que para los Filtros Activos presentan transistores o amplificadores operacionales en conjunto con los componentes pasivos como son las resistencias, inductores y capacitores. Sin embargo, Elwakil (2014) comenta que implementar transistores no es tan común, debido a que presentan cierto límite de rango dinámico y distorsión armónica lo cual afectaría en no interpretar las señales correctamente, pero que a su vez son los más adecuados para reducir el consumo de potencia e incrementar el ancho de banda del filtro (p. 1).

Planteamiento del problema

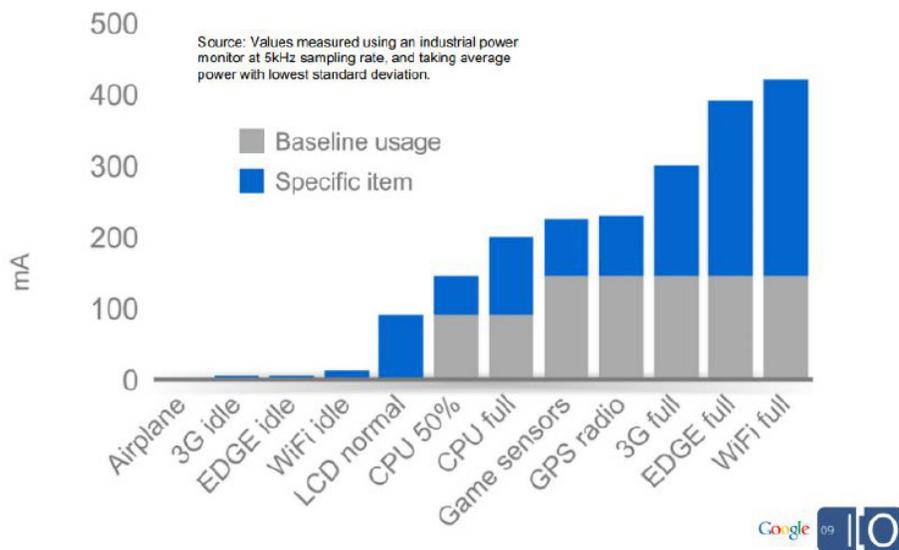
Uno de los principales problemas a los que se enfrenta la sociedad hoy en día es el desabasto energético. Aunado a lo anterior, dicho problema se ve empeorada por la electrónica actual, la cual ha permitido que los usuarios demanden una mayor cantidad de funciones y aplicaciones dentro de sus dispositivos móviles y estacionarios. Ejemplo de estas demandas son: el procesamiento de video en HD y 4K, Gigabit internet, interconectividad con múltiples dispositivos bajo diferentes estándares, procesamiento de texto, multimedia, etc.

Por lo que desde el punto energético, esta tendencia de integración de servicios en un solo dispositivo propicia un incremento exponencial en el consumo de potencia de toda la electrónica que se usa; un ejemplo de esta tendencia son los Smartphones, cuyo tiempo promedio entre cargas es de un día. En otras palabras, un número mayor de servicios implica un mayor consumo de potencia y viceversa,

conforme al análisis de la Figura 2. Ante esta premisa existe una posible solución, la cual es reducir el número de los servicios que se integran en los dispositivos inteligentes. Sin embargo, esto no es factible ya que no es aceptable por parte de los usuarios y mucho menos por parte de la industria de circuitos integrados y microprocesadores cuya figura de mérito es la integración del doble de transistores en uno solo de silicio por cada año. Por ende, la única solución permeable yace en el diseño de circuitos electrónicos.

Figura 2.

Consumo energético con los servicios del teléfono móvil.



Nota. Jeff S., 2009, Adaptado de “Coding for Life—Battery Life, That Is”, GoogleIO http://www.kandroid.org/board/data/board/AndroidBeginner/file_in_body/1/W_0300_CodingforLife-BatteryLifeThatIs.pdf

Es necesario mencionar que, dentro de las estrategias actuales que plantea el diseño de circuitos electrónicos para reducir el consumo de potencia, están las

filosofías con bajo voltaje y baja corriente, las cuales limitan las frecuencias de trabajo del circuito en cuestión. Es decir, dichas estrategias afectan especialmente en el área de procesamiento de señales analógicas, ya que usan Amplificadores Operacionales (OpAmp) y Amplificadores de Transconductancias (OTA) como elementos activos para la síntesis de filtros analógicos, reduciendo el rango de salida y el ancho de banda. Aunado a lo anterior, el OpAmp y el OTA son circuitos integrados que están conformados por una red de por lo menos veinte transistores conectados en un arreglo de mínimo de cuatro ramas de corriente los cuales se interconectan aproximadamente en ocho nodos.

De esta forma, se puede observar que el consumo de potencia y velocidad de trabajo del elemento activo a implementar dentro del filtro analógico está ligado de manera directa y proporcional al número de transistores que lo compone, con base en el número de ramas de corriente que dispone y con el número de nodos internos que conecta a los componentes electrónicos. Gracias a esta inferencia es que se puede denotar que al reducir el número de transistores que conforma el elemento activo dentro de un filtro se reduce el consumo de potencia y a su vez se incrementa la velocidad de operación del mismo. Por lo que el diseño de filtros analógicos que usan un solo transistor como elemento activo abre las puertas a una nueva área de investigación con un gran impacto en el desarrollo de tecnologías actuales.

Revisión bibliográfica

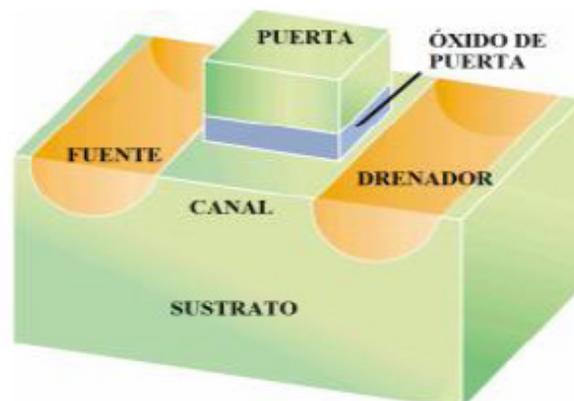
Mejorar el procesamiento de señales es una de las principales metas dentro del desarrollo tecnológico actual. Por esta razón se han planteado diferentes metodologías para poder implementar Filtros Activos. Así mismo, se han usado distintos tipos de transistores, componentes o simplemente se ha cambiado la configuración de circuitos de manera drástica. La finalidad de estos cambios

es que los filtros puedan ser usados en cualquier sistema de comunicaciones, instrumentación y adquisición de señales.

La tecnología CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) ha sido uno de los procesos de fabricación más utilizados hasta el momento. La principal ventaja de CMOS consiste en hacer uso básico de transistores de efecto de campo NMOS (Negative Channel Metal-Oxide Semiconductor) y PMOS (Positive Channel Metal-Oxide Semiconductor), los cuales permiten reducir el consumo de energía del circuito que los incluye. En suma, Razavi (2001) habló que los transistores CMOS cuentan con cuatro terminales: Fuente (Source), Drenaje (Drain), Compuerta (Gate) y Cuerpo (Bulk) (2001, p. 10); las cuales se muestran en la Figura 3. Por lo que los transistores MOS están unidos mediante contactos de aluminio que sirven como interconexiones de baja resistencia y capacitancia. Además, las principales ventajas de utilizar transistores CMOS es la baja disipación de energía solo durante la conmutación, a su vez requiere de pocos dispositivos, y a su vez ha tenido una gran aplicación en el diseño analógico y con bajo costo monetario.

Figura 3.

Estructura interna de un Transistor CMOS

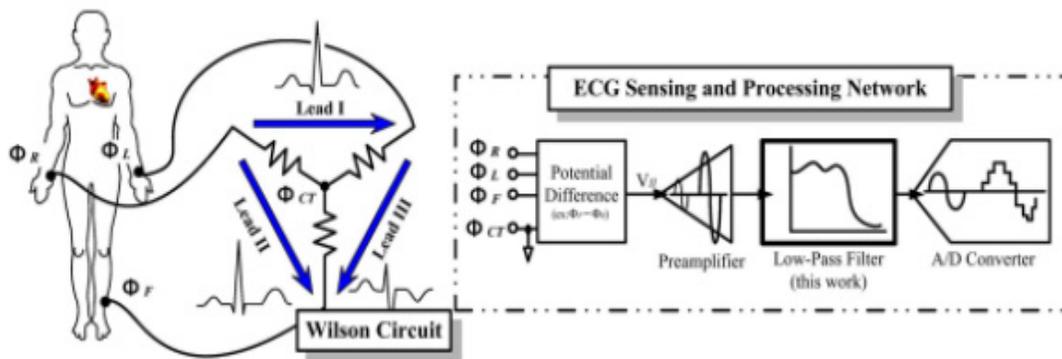


Nota. Winter, C. P. y Muñoz Contreras, F., 2010, "El Futuro de la Tecnología CMOS", Enginy@eps. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6399557>

Un aspecto importante fue el estudio de Lee & Cheng (2009) quienes diseñaron un Amplificador de Transconductancia Operacional Diferencial (OTA por sus siglas en inglés), como se observa en la Figura 4, el cual sirve para monitorear la actividad cardiaca. Por lo que atenuaron la interferencia fuera de banda, es decir, tomaron en cuenta un filtro Butterworth de quinto orden con una respuesta plana a una frecuencia de corte de 250 Hz, con un buen rendimiento. Para cumplir con el objetivo, compactaron la arquitectura propuesta a dos transistores, ya que los requisitos a cumplir fue el ahorro y duración de energía de los equipos portátiles.

Figura 4.

Filtro para la detección de ECG portátil



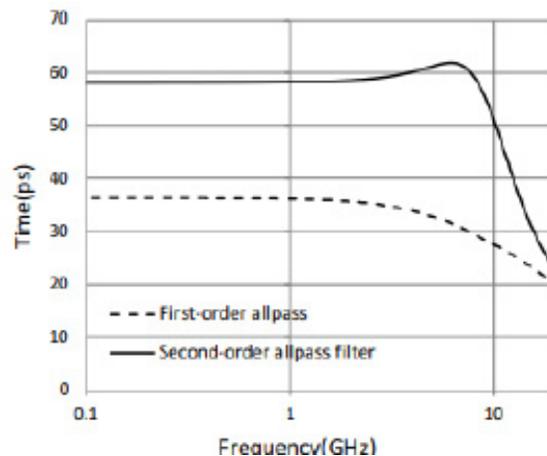
Nota. S. Lee y C. Cheng, 2009, *Diseño y Modelado Sistemático de un Filtro OTA-C para Detección de ECG Portátil* (p. 54), Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 3(1), <https://ieeexplore.ieee.org/document/4738432>

En cuanto Peyman et al. (2013) propusieron filtros pasa todo de primer y segundo orden en modo corriente implementados en tecnología de 130 nm CMOS, utilizando BSIM4. Esto con el fin de que los filtros propuestos puedan lograr

retrasos mayores por las bajas impedancias tanto de entrada como de salida. Esta implementación mejoró en el desempeño del filtro en términos de eficiencia de área, además de verificar su funcionamiento a 10 GHz, enseguida compararon los resultados entre el filtro de primer y segundo orden. Esta implementación destacó por reducir el consumo de área, el número de inductores y el consumo de potencia en contraste con otras implementaciones. A su vez, mostró una baja impedancia, un retardo de 33 ps (Tiempo) y 60 ps a una frecuencia de operación de 10 GHz, se puede ver en la Figura 5.

Figura 5.

Respuesta de retardo de los Filtros Pasa Todo de 1er. Y 2do. Orden



Nota. Peyman et al., (2013), “10-GHz current-mode 1st-and 2nd-order allpass filters on 130nm CMOS” (p. 3), 2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWS-CAS), (3). <https://ieeexplore.ieee.org/document/6674570>

Años atrás con base en las metodologías que utilizaron para los circuitos activos, Ahmed (2009) modeló un transistor como una red de dos puertos y empleó

síntesis de filtros con dos y tres impedancias. Las técnicas que utilizaron fueron relativamente antiguas y establecidas, puesto que usó un modelo de dos puertos para un transistor.

Método y Metodología

Existen diferentes metodologías para diseñar y sintetizar filtros analógicos. Sin embargo, en este trabajo se utiliza la siguiente:

1. Establecer los parámetros del filtro.
 - 1.1. Tipo: Pasa Bajas, Pasa Altas, Pasa Banda o Rechaza Banda.
 - 1.2. Polinomio del filtro: Butterworth, Chebyshev, Bessel o Elíptica.
 - 1.3. Orden y clasificación.
2. Obtener la función de transferencia matemática.
3. Obtener la función de transferencia del circuito.
4. Igualar la función de transferencia matemática con la del circuito. Esto para adquirir los coeficientes de los elementos que conforman el filtro a 1 rad/s.
5. Aplicar un factor de escalamiento en frecuencia. Se desplaza la frecuencia de corte de 1 rad/s hacia la frecuencia deseada, modificando así los valores de los componentes.
6. Aplicar un factor de escalamiento en impedancia. Se ajustan los valores de los elementos a valores integrables.

Con dicha metodología, se aborda el diseño, desarrollo matemático, selección y simulación de filtros activos basados en un solo transistor CMOS de 4 terminales que son: Bulk, Drain, Gate y Source de canal N. Una vez cavilado, se procede a diseñar cada uno de los cuatro diagramas básicos, los cuales tienen una terminal común, y así obtener diferentes combinaciones de circuitos con la finalidad de identificar cada una de las familias a modelar.

Posteriormente se hace un análisis con la Ley de Kirchhoff considerando el método de nodos para cada uno de los circuitos obtenidos en el anterior paso, con esto se obtuvo la función de transferencia general de cada familia. Sin embargo, debido a que el transistor tiene cuatro terminales, la función de transferencia se mapeó usando una terminal común, una terminal de entrada de señal, y dos terminales de salida de señal. Debido a la complejidad de las funciones de transferencia a obtener, se utilizó el software Maple para encontrar la solución de las mismas.

Una vez que las funciones de transferencia fueron obtenidas, se realizó una planeación para sustituir cada una de las impedancias en las funciones de transferencia. Dicha planeación fue realizada usando solo resistencias-capacitores (RC), y usando resistencias-capacitores-inductores (RCL). Al sustituir estos componentes se obtuvo un conjunto bastante amplio de nuevas funciones de transferencia que pueden mapear filtros analógicos. Debido a la gran cantidad de funciones de transferencia obtenidas, estas fueron agrupadas en tablas.

Por otro lado, se investigaron y complementaron las tablas de los polinomios matemáticos usados para filtrar señales. Puesto que estos polinomios han sido ampliamente estudiados, se utilizaron los más comunes usados en la literatura, en este trabajo fue el Butterworth, Bessel y Chebyshev de tipo 1 de 3 dB. Con ayuda de los polinomios anteriores y las funciones de transferencia simplificadas en Maple, se procedió a descartar cada función de transferencia mediante el siguiente criterio. La función de transferencia del circuito es válida e implementable siempre y cuando esta contenga cada uno de los términos del polinomio de filtrado, sin

excepción alguna. De lo contrario, la función de transferencia y el circuito que le dio origen quedan descartados.

Para implementar un filtro se identificó el polinomio que tenía la forma deseada y se igualó con la función de transferencia del circuito que tenía la misma forma del polinomio. Posteriormente, se igualaron uno a uno los coeficientes del polinomio con los de la función de transferencia para obtener un conjunto de ecuaciones que se deben de resolver para obtener los valores de cada elemento; esto se realizó de igual forma con Maple. Los valores que se utilizan deben ser únicamente reales y positivos.

A continuación, se simulan los circuitos con el programa de LTspice XVII de manera de que se identifica la frecuencia de corte. Posteriormente, se hace un escalamiento en frecuencia e impedancia para obtener los valores comerciales de los elementos a utilizar, cuando en algún momento se deseen aplicar.

Resultados

Con base en lo anterior se sintetizaron, diseñaron y simularon filtros que cumplen con las siguientes especificaciones:

1. Polinomio de filtrado tipo Butterworth.
2. Frecuencia de corte de 910 MHz en el caso de los filtros pasa baja y pasa alta. Frecuencia central de 910 MHz en el caso de los filtros pasa banda y rechaza banda.
3. Los valores de la transconductancia de drenaje y la transconductancia de cuerpo se fijan a $gm=1 S$ y $gmb=0.1 S$, respectivamente. Estos valores solo se fija en el

paso 4 de la síntesis del filtro. Estos valores se verán modificados al aplicar los factores de escalamiento FSF e ISF.

4. Los valores de los capacitores e inductores están limitados a 10 pF y 10 nH, respectivamente. Esta limitación es un valor típico para las tecnologías de fabricación CMOS.

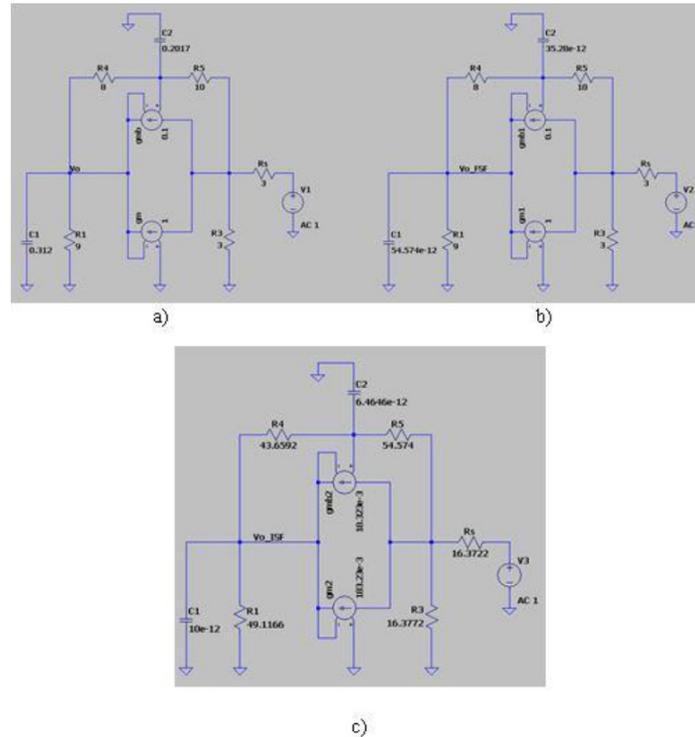
Se obtuvo una cantidad de 426 filtros de los cuales pueden ser realizables, de manera que se hizo una selección al azar y que a su vez se clasificaron de acuerdo a cada terminal de salida. En cada una de ellas se simuló con el fin de obtener P.B, P.A, P.B y R.B.

Se mostró en este caso un ejemplo, el cual es un pasa bajas de segundo orden con terminal de salida en fuente. Con la estructura de CG-ID-OS (Common Gate, Input Drain, Output Source con sus siglas en inglés), bajo la planeación RC, la cual hace uso de únicamente dos capacitores.

Del cual se valida con el proceso de síntesis ya que se realizó un conjunto de simulaciones en AC en el software LTspice. La Figura 6.a presenta el circuito esquemático para una frecuencia de corte de 1 rad/s. A su vez, la Figura 6.b muestra el circuito esquemático después del proceso del FSF y la Figura 6.c muestra el circuito con los valores de los componentes después del ISF.

Figura 6.

Filtro pasa bajas de segundo orden bajo la estructura CG-ID-OS. a) Filtro estandarizado a 1 rad/s. b) Filtro después del escalamiento FSF. c) Filtro después del escalamiento ISF.

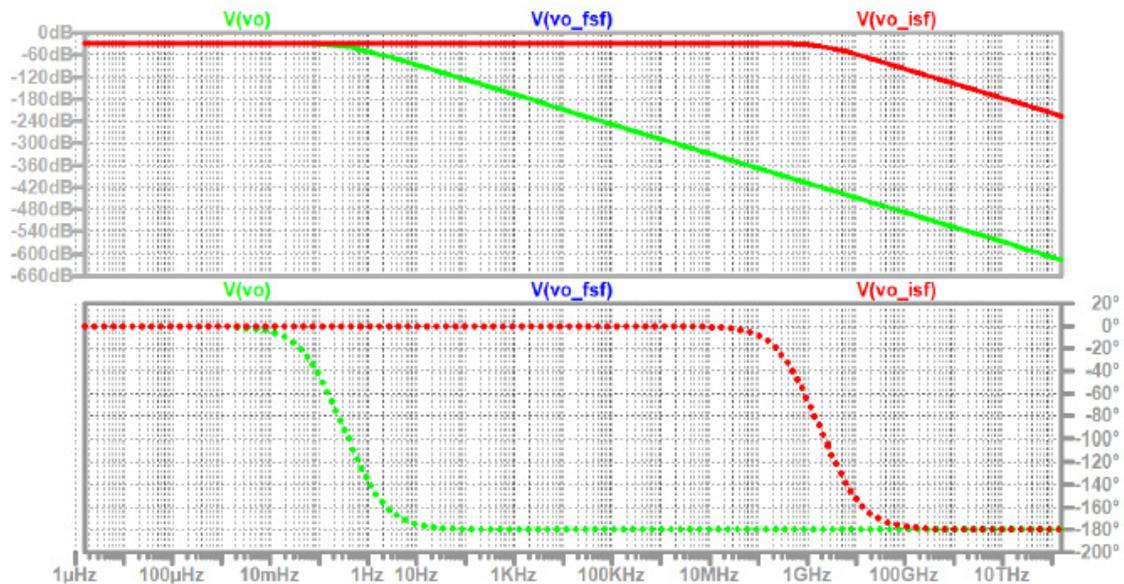


La Figura 7 muestra el resultado de las simulaciones de los tres circuitos de la Figura 6. Cabe mencionar que las simulaciones se realizaron desde los 159 μ Hz hasta los 159 GHz con la finalidad de poder observar el desempeño de los tres circuitos en una sola imagen. El trazo verde de la Figura 7, correspondiente a la respuesta del filtro estándar de 1 rad/s, presenta una ganancia en la banda de paso de -27.803 dB, una $f_c=0.129$ Hz a -30.803 dB, y una pendiente de -40 dB/dec; la desviación en la frecuencia de corte, idealmente 0.159 Hz, se debe a que los valores de los componentes fueron truncados a tres decimales. Por otra parte, el trazo azul y rojo presentan la respuesta del filtro después de aplicar los escalamientos FSF e ISF; el trazo azul no se alcanza a apreciar debido a que esta encimado con el

rojo. En ambas respuestas, FSF e ISF, se ilustra como la frecuencia de corte se ha desplazado a $f_c=743.69$ MHz mientras se mantiene la ganancia en la banda de paso y la pendiente en la banda de rechazo; este error del -18.27% sobre los 910 MHz solicitados se debe, nuevamente, a truncar los valores en cada una de las etapas de la síntesis.

Figura 7.

Respuesta en frecuencia de los filtros de pasa bajas de segundo orden bajo la estructura CG-ID-OS. a) Filtro estandarizado a 1 rad/s. b) Filtro después del escalamiento FSF. c) Filtro después del escalamiento ISF.



Conclusiones y discusión

En este trabajo se abordó la síntesis y diseño de filtros activos los cuales trabajaron con un transistor CMOS, para la filtración y simulación en bandas de radio frecuencia a 910 MHz. De esta manera se desarrollan las configuraciones básicas

de los circuitos, posteriormente se realiza un análisis con el método de nodos por voltaje para idealizar las funciones de transferencia, continuando con el desarrollo de dos planeaciones: la primera con capacitores y resistencias, la segunda en adición de inductores, para así idealizar tanto la cantidad de circuitos que se pueden crear como también de los elementos que pueden presentar sin repetición alguna.

Así mismo se generó un logaritmo con el software Maple, el cual se le establece los elementos del paso anterior para complementar las F.T. posteriormente se creó otro programa para asignar valores aleatorios en cada elemento, los cuales poseen un rango del 1 al 10 (Ohms, Hertz y Faradios). Para así diseñar y simular los circuitos utilizando el software LTspice, el cual es gratuito y no presenta limitantes. Después de ello se les aplica un escalamiento en frecuencia e impedancia para idealizar el valor comercial de cada componente e identificar su frecuencia de corte. Esto con el fin de que en un futuro se creen dichos circuitos, con costo monetario bajo, brindando accesibilidad monetaria en las bandas de radio frecuencia y que a su vez cumplan con el límite de Hz esperado.

En un principio se optó por establecer la planeación RC para desarrollar las funciones de transferencia. De esta forma surge un problema que es la eliminación y compresión de la mayoría de las F.T., esto porque no se identificaba variedad de tipo de filtros. Tomando esto en cuenta se crea una segunda planeación, pero con adición de inductores. Sin embargo, si se llegasen a implementar ya no cumpliría nuestro objetivo, dado que ocuparían mucho espacio los inductores, al menos que se opte por utilizar dos capacitores más para aparentar un inductor. En adición, al aplicar el escalamiento tanto en frecuencia como impedancia se identificó que no todos los circuitos se pueden plantear dado que al localizar el ancho de banda no se encontraba a -3 dB, la frecuencia de corte sobrepasaba el límite de la esperada y que los valores de los componentes incrementaban más del rango, dado que el valor máximo que se podía tener era de 10 pF en capacitores y 10 nF en inductores.

La emisión de señales se dio de forma óptima para algunos filtros, como son los pasa altas, pasa bajas, rechaza banda y en algunos casos los pasa banda, ya que las ondas cumplían con la forma adecuada además de una frecuencia de corte aceptable. Al funcionar de manera correcta cada circuito con la asignación de los componentes con valores comerciales y la transmisión de las ondas se dio de forma admisible, llegando a la creación de múltiples filtros con un transistor CMOS y así ocupar un espacio mínimo al momento de aplicarlos como también el reducimiento del consumo de potencia en bandas de radiofrecuencia.

Esto tendría un gran impacto en el gasto energético al procesar señales de radio frecuencia que presentan los componentes electrónicos que se usan cada día, como son los celulares, televisiones, computadoras, máquinas, entre otros. Ya que el desabasto energético ha ido incrementando exponencialmente con el paso de los años a nivel mundial, de manera que se ha generado una crisis energética, es por ello que el presente estudio podría solucionar parte de este problema.

Referencias

- Ahmed, E. (2009). On the or-Port Network Classification of Colpitts Oscillators. *IET Circuits, Devices & Systems*, 3(5),223-232. https://www.researchgate.net/publication/224603455_On_the_two-port_network_classification_of_Colpitts_oscillators
- Elwakil, A. S. (2014). Single Transistor Active Filters: What is Possible and What is Not. De “*IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*”. 61(9), 2517-2524. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6848865>
- Lee, S. y Cheng, C. (2009). Systematic Design and Modeling of a OTA-C Filter for Portable ECG Detection. De “*IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*”.3(1), 53-64. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4738432>

Peyman, A., Leonid, B., Hossein, T. y Arjuna, M.(2013). 10 GHz current-mode 1st and 2nd order allpass filters on 130 nm CMOS. *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1-4. https://www.researchgate.net/publication/261072315_10-GHz_current-mode_1st-and_2nd-order_allpass_filters_on_130nm_CMOS

Razavi, B. (2001). *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* (1^a ed). McGraw-Hill Higher Education.