
Capítulo VII

Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación

This is not the end. It is not even
the beginning of the end. But it is,
perhaps, the end of the beginning.

Winston Churchill

Para finalizar la presente memoria, se comentarán a modo de resumen los principales resultados expuestos y justificados a lo largo de los apartados precedentes. El capítulo concluye presentando las futuras líneas de investigación que pueden llevarse a cabo como continuación de este trabajo dentro de la sintonía automática para filtros de tiempo continuo.

SUMARIO DEL CAPÍTULO.

Capítulo 7.- <u>Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación</u>	279.
7.1.- Conclusiones	283.
7.2.- Futuras Líneas de Investigación	288.

7.1.- CONCLUSIONES.

A modo de resumen de todo el material expuesto en los capítulos precedentes de la presente memoria, se enumeran en este apartado aquellos resultados y conclusiones más relevantes, divididos en los diferentes bloques temáticos tratados en la misma.

Respecto al proceso genérico de sintonía automática, se ha realizado un análisis comparativo de diferentes métodos de control para la sintonía automática *on-chip* de filtros de tiempo continuo aparecidos en la bibliografía. Se han analizado las implicaciones en cuanto a su implementabilidad en el dominio analógico y evaluado la idoneidad de dichos métodos de control para su realización y funcionamiento conjuntamente con los filtros que deben sintonizar. Los resultados extraídos de este análisis quedan reflejados en el capítulo 2.

Referente a la célula MRC (*MOS Resistive Circuit*) empleada en la presente tesis doctoral como elemento resistivo controlado electrónicamente, el análisis detallado del comportamiento de la estructura ha dado lugar a las siguientes consideraciones:

- En primer lugar, se ha identificado el comportamiento no lineal y no simétrico que presenta la estructura MRC en simulación si se utiliza el extendido modelo BSIM3 para los transistores MOS. Se ha mostrado que dicho comportamiento no simétrico es, sin duda, incompatible con la natural simetría de los transistores MOS que componen la célula.
- Se ha determinado que la inapropiada formulación de la variación con el campo transversal aplicado en el transistor MOS de la movilidad de los portadores propuesta por el modelo BSIM3 es responsable de esta asimetría de comportamiento.
- Se han estudiado otros modelos del transistor MOS que reflejan en su concepción la simetría propia del transistor. Se ha recomendado el uso del modelo EKV siempre que sea posible, porque ofrece un modelado del transistor MOS más acorde con el funcionamiento real y simétrico del dispositivo.
- Debido a que el modelo EKV está poco extendido ya que, o bien no está disponible en los simuladores, o bien son los parámetros de la tecnología que se quiere implementar los que no están accesibles para este modelo, se propone una modificación del modelo BSIM3 (que está mucho más accesible que el EKV) inspirada en el tratamiento de la variación de la movilidad de los portadores en el transistor MOS del modelo EKV. Este modelo permite corregir las deficiencias detectadas en la expresión de la movilidad por el modelo BSIM3.
- Se ha cuantificado el efecto de la tensión de modo común en los terminales de entrada de la célula MRC sobre el comportamiento de la misma a través de la movilidad de portadores.

- Se ha cuantificado el efecto de la diferencia de tensiones en los terminales de salida de la célula MRC sobre el comportamiento de la misma a través de la movilidad de portadores.
- Se ha sugerido un modelo completo de seis resistencias para el MRC que incluye no sólo el comportamiento no lineal debido a la movilidad de los portadores, sino también el efecto provocado por la desigualdad en las tensiones de los terminales de salida de la célula MRC.
- Se han presentado una serie de indicaciones o recomendaciones de diseño que permiten minimizar los efectos no lineales que presenta la celda MRC sobre aquellos circuitos que la contienen. Básicamente dichas recomendaciones se resumen en:
 - a) Realización de diseños completamente balanceados (*fully-balanced*) para minimizar la tensión de modo común de los terminales de entrada del MRC.
 - b) Utilización de amplificadores operacionales con ganancia en lazo abierto suficientemente elevada para minimizar la diferencia en las tensiones de sus terminales de salida.
 - c) Simulación de los diseños mediante el modelo EKV, pues describe de forma más adecuada el comportamiento simétrico del transistor MOSFET que el modelo BSIM3.

Referente al análisis y diseño del filtro pasa-banda de segundo orden con topología TQE (*Transimpedance Q-Enhancement*) que se ha implementado en tecnología CMOS 0,8 μm , el estudio detallado de su comportamiento ha permitido la realización de las siguientes propuestas y conclusiones:

- Al margen de su posterior o no sintonía automática, se ha presentado una modificación en la estructura de filtro TQE que permite independizar por completo los ajustes de la frecuencia central y del factor de calidad. Esta completa independencia se consigue a través de la inclusión en el lazo general de realimentación de la topología de una etapa de ganancia G (realimentación activa), cuyo valor es inversamente proporcional a la resistencia que fija la frecuencia central. Así, en esta nueva topología presentada, la variación de los parámetros que ajustan uno de estos dos factores no afecta al ajuste del otro.

Esta independencia ha quedado corroborada al obtener un valor nulo en la función de transferencia que relaciona las variaciones de la amplitud de la señal de salida con las de la tensión que sintoniza la frecuencia ($\tilde{A}_O(s)/\tilde{v}_{CF}(s)$), cuando dichas variaciones de pequeña señal se producen alrededor del punto de trabajo en que la frecuencia de la señal de referencia coincide con la frecuencia central del filtro ($\omega_{in}=\omega_O$). Dicha función ha sido obtenida a partir del modelizado propuesto en el capítulo 6.

- Esta modificación puede generalizarse a estructuras de variable de estado como la implementada en este trabajo de tesis. En ellas es común que la frecuencia se fije mediante una resistencia (llámese R_1) que también afecta al factor de calidad. Dicho factor de calidad depende de la relación entre esta resistencia y

una segunda (llámese R_2), de manera que puede ser fijado como segundo paso mediante este segundo componente (aunque en la bibliografía a este tipo de ajuste se le suele calificar como '*independiente*'). Como consecuencia de este trabajo, se propone introducir una etapa de ganancia G en la realimentación inversamente proporcional a R_1 , consiguiendo así que el factor de calidad no dependa del valor de esta resistencia. De esta forma, el ajuste de la frecuencia se efectúa mediante R_1 sin afectar al factor de calidad, y la fijación de éste último se realiza mediante R_2 sin afectar a la frecuencia central, obteniendo así un filtro con *independencia real* entre los ajustes de estos dos parámetros.

- Esta independencia en la estructura TQE modificada comporta una implicación adicional interesante, y es que permite alcanzar todo el margen de sintonía de Q (de 0,5 a 15 en este diseño concreto para el margen de tensiones de control elegido entre 0 V y 1 V), independientemente de la frecuencia central de sintonía fijada, tal y como quedó demostrado en el capítulo 4 (apartado 4.6.1). Recuérdese que, en la topología TQE inicial, el *valor máximo* del factor de calidad ajustable *depende del valor de la frecuencia central del filtro* y puede quedar limitado por debajo del valor teórico de 15. Intentar alcanzar para cualquier frecuencia central este valor máximo de 15, requeriría aplicar una tensión de control superior a 1 V , circunstancia que violaría los márgenes asignados y, por tanto, podría hacer que los transistores de las células MRC dejaran de trabajar en la zona óhmica.
- Se ha demostrado, mediante el respectivo análisis de sensibilidades, las relaciones idóneas que deben cumplir los valores de los componentes pasivos (resistencias y condensadores) de la estructura TQE para minimizar las sensibilidades de los parámetros del filtro respecto de dichos componentes.
- Se ha justificado y realizado la correcta determinación de las dimensiones de los transistores que forman las diferentes células MRC del filtro implementado, en función del margen de tensiones disponible para el control de la mismas y de los márgenes frecuencial y de factor de calidad que, por especificaciones, requieren ser cubiertos.

En el capítulo 4, junto con el diseño del filtro ya comentado, y cuyas conclusiones se han destacado en los puntos precedentes, se ha presentado un análisis pormenorizado de los lazos de sintonía. Dicho análisis ha permitido:

- Proponer una estructura de sintonía para la frecuencia central y el factor de calidad que es compacta, eficaz y, a la vez, no excesivamente compleja comparada con la estructura del filtro principal cuyos parámetros (frecuencia central y factor de calidad) desean ser ajustados.
- Analizar y comparar dos propuestas para la detección de amplitudes en el lazo de control para la sintonización del factor de calidad Q , basadas en la realización de productos de las señales de entrada y de salida del filtro *master*, que permite la adecuada sintonía de este parámetro a través de detectores coherentes, sin necesidad de los clásicos detectores de pico.

Un aspecto a destacar, en relación con la segunda de las dos propuestas efectuadas, es que la señal de control que sintoniza el factor de calidad Q es completamente independiente del desfase entre las señales de entrada y salida al filtro *master*, lo cual independiza más la dinámica de los dos lazos de control.

- Justificar la inclusión genérica de un desfasador de $\pi/2$ sintonizable en el lazo de sintonía de la frecuencia con el fin de obtener la necesaria cuadratura entre las señales de entrada y salida del filtro *master*, cuando éste es una estructura pasa-banda (independientemente de la topología empleada). Puesto que cuando el filtro está sintonizado presenta desfase nulo entre entrada y salida, este desfase de $\pi/2$ es necesario. En la sintonía de estructuras pasa-bajos o pasa-altos dicho desfasador no sería necesario, puesto que en el punto de sintonía ($\omega_0 = \omega_{REF}$) las señales de entrada y salida al filtro se presentan en cuadratura.

Ha quedado patente la mejor opción que representa este desfasador de $\pi/2$ propuesto frente a otras soluciones como, por ejemplo, un circuito integrador, ya que este último acarrea los siguientes problemas prácticos: la elevada atenuación que presenta cuando trabaja con frecuencias elevadas alejadas del punto de ganancia unidad, y la posibilidad de saturación debido a *offsets* de tensión en el circuito.

Cabe reseñar que las estrategias propuestas para los lazos de sintonía son, en líneas generales, independientes de la topología escogida para el filtro que debe ser sintonizado (sea ésta TQE, Sallen-Key, estructuras biquad de Akerberg–Mossberg, Tow–Thomas, etc.) y de la técnica empleada para realizarlos (*MOSFET-C-Op.Amp.*, *gm-C-Op.Amp.*, *gm-C-OTA*, etc.). Por tanto, el diseño de los lazos podría ser ‘reutilizable’ en futuras estructuras de filtrado de tiempo continuo susceptibles de ser sintonizadas *on-chip*.

En lo referente al diseño microelectrónico de los diferentes bloques constructivos que forman parte del conjunto de filtrado con su sistema de sintonía automática, cabe destacar las siguientes conclusiones:

- Se ha propuesto la célula MRC como bloque básico de procesado para la implementación microelectrónica, tanto para los resistores controlados electrónicamente de los filtros *master* y *slave*, como para los multiplicadores analógicos requeridos en ambos lazos de control.
- Se ha diseñado e implementado un amplificador operacional completamente balanceado específico para el filtro con sintonía automática con el que se obtiene una ganancia en lazo abierto suficientemente elevada (118 dB a frecuencia nula), con el fin de conseguir que en las células MRC conectadas en sus entradas se minimicen los efectos no lineales debidos a despareamientos en las tensiones de estos dos terminales. Se ha tenido además especial cuidado en el diseño del amplificador de error de la tensión de modo común de los terminales de salida, para minimizar los errores de tensión de *offset* y controlar el valor de dicha tensión en modo común.

- Se han diseñado y realizado comparadores de tensión con diferentes niveles de tensión de salida en función de si éstos son conectados a los drenadores de los transistores de las células MRC (generalmente considerados los terminales de entrada de señal), o bien a las puertas de los mismos (consideradas normalmente como terminales de control). De esta forma, se asegura el correcto funcionamiento en zona óhmica de los transistores de las celdas MRC que los siguen. Asimismo, cabe destacar el especial cuidado en el diseño de los comparadores de tensión para que puedan funcionar adecuadamente con baja amplitud en las tensiones de entrada (del orden de varias decenas de mV).
- Se han presentado y realizado desplazadores de nivel para la adecuación de las señales a la entrada de las diferentes células MRC.
- Se ha diseñado un desfasador de 90° sintonizable, necesario en la sintonía de frecuencia, que implementa un par polo-cero sintonizable y simétrico respecto el eje $j\omega$ del plano s (célula pasa-todo sintonizable de primer orden), gracias, por un lado, a la fácil realización de resistencias negativas mediante el MRC y, por otro, a la posibilidad de sintonía del mismo.

Con relación a la propuesta de modelizado genérica para filtros de tiempo continuo con capacidad de sintonía y el análisis efectuado basado en el mismo, pueden destacarse los siguientes resultados y conclusiones:

- Se ha presentado un proceso *sistemático y general* para el modelizado en pequeña señal de filtros analógicos sintonizables. Este proceso permite el análisis de un modelo lineal del lazo completo con el que se obtiene un estudio de la estabilidad local del sistema y la posibilidad de plantear los controladores adecuados para la sintonía automática de los parámetros (frecuencia central y factor de calidad) del filtro.
- La aproximación considera un modelo incremental linealizado partiendo de la característica bilineal de este tipo de filtros adaptativos, así como la naturaleza sinusoidal de la señal de referencia de entrada (y por tanto de las variables de estado del filtro). La incorporación de dicha naturaleza sinusoidal se ha realizado mediante la sustitución en las ecuaciones bilineales del filtro de la señal de entrada y de las variables de estado del sistema por los correspondientes fasores.
- El modelizado planteado realiza un cambio que ha permitido sustituir las variables de estado del filtro por unos índices característicos de las mismas. Dichos índices son la amplitud y el desfase (respecto de la señal de entrada al filtro) de cada una de las variables de estado. Estos índices son justamente las variables de interés utilizadas por los lazos para cumplir sus objetivos de sintonía.
- El modelo obtenido ha permitido la consecución de unas funciones de transferencia que relacionan las tensiones de control de los parámetros del filtro con los nuevos índices (amplitud y desfase).

- Aunque por sencillez las funciones posteriormente se han particularizado al punto de sintonía en que la frecuencia central del filtro coincide con la frecuencia de la señal de referencia (señal de entrada al filtro), dichas funciones han sido obtenidas para cualquier punto de trabajo del filtro, esté éste sintonizado o no.
- Como ejemplo, el proceso de modelizado se ha particularizado para las topologías TQE y TQE modificada.
- Se ha completado el estudio con el diseño de sendos controladores para los lazos de control de la frecuencia central y del factor de calidad del filtro que mejoran las prestaciones del controlador integral utilizado habitualmente.
- La comparación de la sintonía efectuada por el controlador integral, clásicamente utilizado en los lazos, y el propuesto a partir del modelizado presentado en la tesis ha permitido corroborar la mejora obtenida con este último.
- Se ha propuesto la realización de controladores sintonizables mediante células MRC, de manera que puede realizarse la sintonía de sus ceros y polos mediante la misma tensión de control que sintoniza la frecuencia central del filtro. De esta forma, la relación entre los ceros y polos del controlador respecto de la frecuencia de sintonía del filtro puede mantenerse constante en todo el margen de sintonía del mismo.

Las publicaciones derivadas del presente trabajo de tesis aparecen señaladas en la bibliografía mediante asteriscos.

7.2.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

Debido, por un lado, a la gran cantidad de aplicaciones que pueden llevar al uso de filtros de tiempo continuo, el rango frecuencial que éstos pueden alcanzar, la gran cantidad de topologías y técnicas a emplear que existen para su implementación y, por otro, a la problemática que conlleva su utilización, las líneas futuras a seguir en sistemas de sintonía automática para los mismos son bastante amplias. Sin embargo, se pueden resumir las principales y más inminentes en los siguientes puntos como continuación directa del trabajo presentado:

- Sobre la base del modelizado matemático propuesto en la presente tesis para filtros de tiempo continuo con capacidad de sintonía, puede plantearse la búsqueda de sistemas de control adaptativos y controladores no lineales compatibles con las técnicas empleadas para la integración de dichos filtros, con el fin de realizar sistemas de sintonía más eficaces tanto en régimen estacionario como transitorio.
- La utilización de los lazos de control propuestos en esta tesis para nuevas estructuras de los filtros *master* y *slave*. A este respecto cabe remarcar que la síntesis de estas estructuras deben dirigirse hacia la fácil sintonizabilidad de sus

parámetros y, en especial, a la independencia entre el ajuste de sus parámetros frecuenciales y de sus factores de calidad.

- Relacionado con el punto anterior, investigar, a partir del modelizado obtenido en la tesis, cómo afectan las diferentes relaciones cuando no pueden separarse las dinámicas de los dos lazos de control y cuáles son las posibles condiciones de separabilidad de las mismas.
- Sistematizar la síntesis de topologías de filtrado, a partir de las matrices obtenidas mediante el modelizado propuesto en el presente trabajo de tesis, con el objetivo de obtener estructuras que proporcionen independencia entre la sintonía del factor de calidad y la frecuencia natural del filtro.
- A partir del diseño presentado en la tesis, realizar el estudio de las posibles modificaciones para poder plantear nuevos y mejores algoritmos de sintonía, así como su utilización en áreas más amplias del procesado analógico, como pueden ser:

- a) Diseño e implementación de estructuras amplificadoras de la señal con control automático de ganancia (AGC).
- b) Diseño e implementación de filtros autosintonizados para frecuencias superiores a las de audio, cubriendo también toda la banda de vídeo e incluso frecuencias mayores a éstas para aplicaciones de filtrado en radiofrecuencia como, por ejemplo, filtros sintonizados para recepción de señales de radio, filtros programables para las etapas de filtrado en telefonía móvil de tercera generación, etc.

A este respecto, hay que decir que ya se está trabajando ([ALA01], [ALA02]) en estructuras basadas en bancos de MRCs donde sus relaciones de aspecto (W/L) están convenientemente escaladas, y conllevan una programabilidad mixta digital y analógica, con el objetivo de incrementar el rango frecuencial de funcionamiento a través de la conmutación de un MRC a otro según la banda frecuencial donde ha de trabajar el sistema.

Otro punto importante a destacar es el relacionado con el funcionamiento del MRC en alta frecuencia, con lo que un nuevo modelo de la celda que complemente el presentado en esta tesis cuando la misma trabaja a frecuencias elevadas debería ser estudiado.

- c) Diseño e implementación de estructuras de filtrado de orden mayor a dos que, mediante un único lazo de sintonía para la frecuencia y otro para el factor de calidad, y escalando convenientemente las tensiones de control de las diferentes células que forman el filtro, permitan obtener circuitos programables que respondan a una determinada función de aproximación (respuesta de Butterworth, de Chebyshev, de Bessel, etc.).