

Micro y nanoelectrónica en moduladores sigma-delta para prediagnóstico médico

Uriel Gabriel Zapata-Rodríguez^{1*}, Jaime Martínez-Castillo²,
Agustín Leobardo Herrera May², Gregorio Zamora-Mejía³

^{1*}Doctorado en Ingeniería, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

²Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología (MICRONA), Boca del Río, Veracruz, México.

³Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Puebla, México.

*uzapata@uv.mx

RESUMEN

En el presente artículo se expone la influencia del diseño micro y nanoelectrónico en los avances tecnológicos del prediagnóstico médico, y con ello la reducción no solo en dimensiones sino en consumo energético de los sistemas portables e implantables, la inclusión de los moduladores Sigma-Delta como parte importante del bloque de conversión análogo digital de señales del dominio continuo al discreto, el procesamiento o almacenaje de las mismas y la generación posterior de sistemas lógicos que permitan arrojar resultados de operaciones con las mismas señales. Se presentan los bloques del diseño, sus componentes, productos terminados como chips y respuestas típicas de las pruebas de dichos dispositivos.

Palabras clave: layout, modulador Sigma-Delta, nanoelectrónica, prediagnóstico médico, sistema biomédico.

Micro- and nanoelectronics in sigma-delta modulators for medical prediagnosis

Uriel Gabriel Zapata-Rodríguez^{1*}, Jaime Martínez-Castillo²,
Agustín Leobardo Herrera May², Gregorio Zamora-Mejía³

^{1*}Doctorado en Ingeniería, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

²Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología (MICRONA), Boca del Río, Veracruz, México.

³Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Puebla, México.

*uzapata@uv.mx

ABSTRACT

In this manuscript micro and nanoelectronic design influence in technological medical prediagnosis advances is exposed, additionally the size and power consumption reduction in the implantable systems and devices, as the inclusion of Sigma-Delta modulators as important part of the analog to digital conversion block, and the processing and storing data before multiple operation with incoming signals. Design building blocks, its components, terminal devices as Chips and typical test and responses are also presented.

Keywords: layout, Sigma-Delta modulators, nanoelectronics, medical prediagnosis, sistema biomédico.

Introducción

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta nuestra sociedad es su crecimiento exponencial, el cual conlleva a superar la demanda de alimentos, vivienda y salud; todo esto a expensas de bajos derroches económicos por parte de los gobiernos regentes. Basados en un enfoque de salud, la necesidad de brindar diagnósticos más certeros y rápidos reduce los costos monetarios de dicho servicio. Sin embargo, esta habilidad se ve mesurada por la baja población médica capacitada y falta de instrumental dedicado. Una de las soluciones más factibles presentadas hasta la fecha es integrar sistemas electrónicos inteligentes a sensores biomédicos capaces de emitir un diagnóstico fiable o por lo menos reducir el número de posibles factores que causan el padecimiento a diagnosticar. Dicha solución dio origen a una de las áreas de estudio más solicitadas en la actualidad: la electrónica biomédica.

Gracias a la electrónica biomédica ha sido posible la creación de múltiples sistemas como marcapasos, implantes cocleares e implantes de retina, y la reducción en tamaño de electroencefalogramas (EEG), electrocardiógrafos (ECG) y electromiógrafos (EMG), [1-2] (Figura 1).

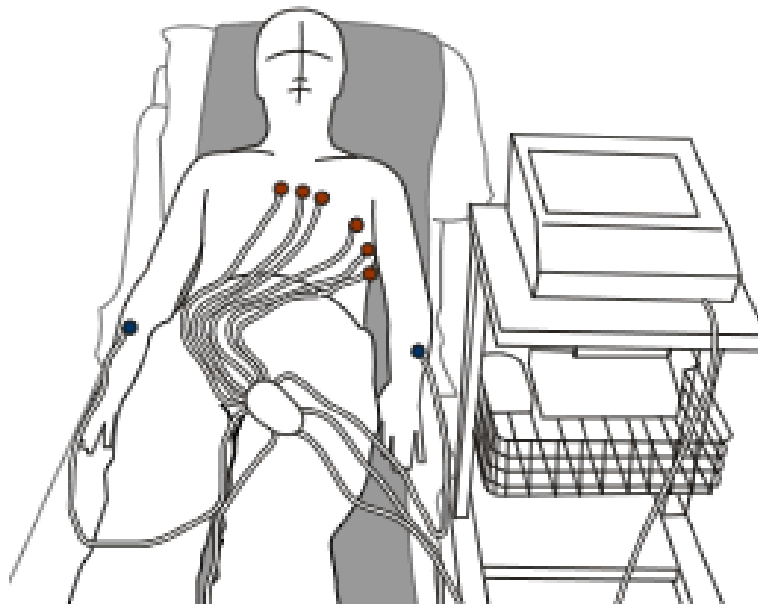


Figura. 1 Ejemplo de ECG.

Sin embargo, llevar a cabo el diseño de los sistemas mencionados anteriormente supone varios retos a superar, como la adquisición de una señal puramente analógica inmersa en señales de ruido cuyos niveles espurios son mayores a la señal de interés, el procesamiento

en un ambiente digital, y el diseño de un ambiente virtual capaz de interactuar con el usuario final (Figura 2).

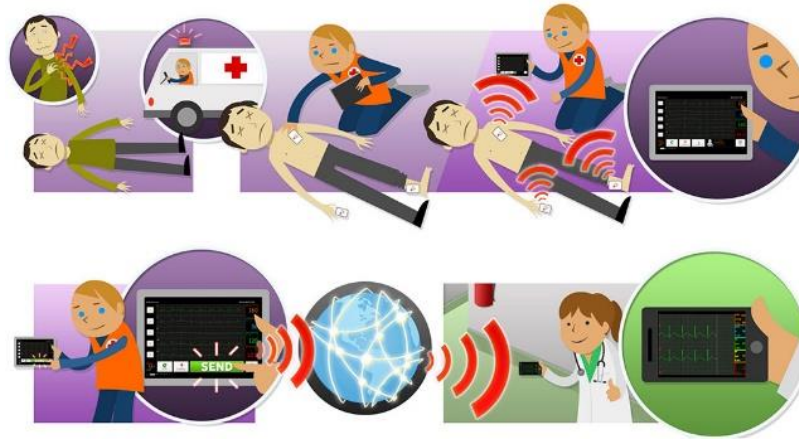


Figura. 2 Sistema de diagnóstico médico.

Arquitectura de un sistema biomédico

Un sistema biomédico, al igual que cualquier sistema de procesamiento de señales digitales, está compuesto por una señal de interés, un circuito de adaptación de señal, un convertidor analógico-digital, una etapa de procesamiento digital (DSP), un protocolo de comunicación, y una interfaz de usuario. La Figura 3 muestra el diagrama de bloques en un microsistema de sensado de actividad neuronal inalámbrico [1].

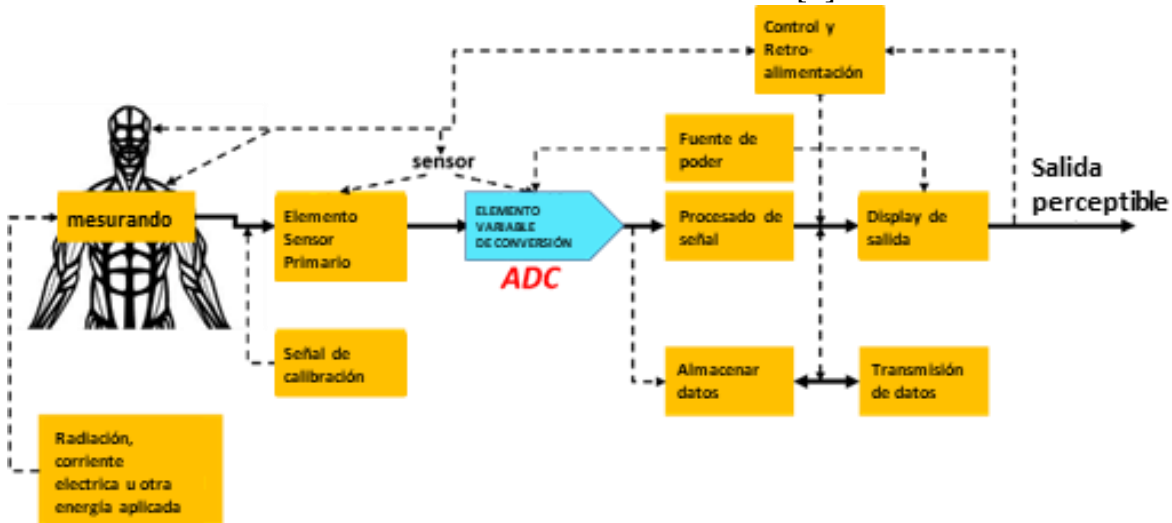


Figura 1. El sensor convierte energía o información a otra forma (usualmente eléctrica). Esta señal es procesada y mostrada de tal modo que los humanos pueden percibir la información. Las conexiones punteadas son opcionales para algunas aplicaciones.

Con la finalidad de mejorar la comodidad de los pacientes y de brindar una mayor conectividad e interoperabilidad, varios sistemas biomédicos (Figura 3) han sido emigrados a versiones inalámbricas (Figura 4) capaces de interactuar con Bluetooth, WiFi, ZigBee, etc. Sin embargo, añadir la ventaja de conectividad inalámbrica agrega una gran desventaja: la reducción en el tiempo de adquisición de datos permitido por la vida/carga útil de la batería).

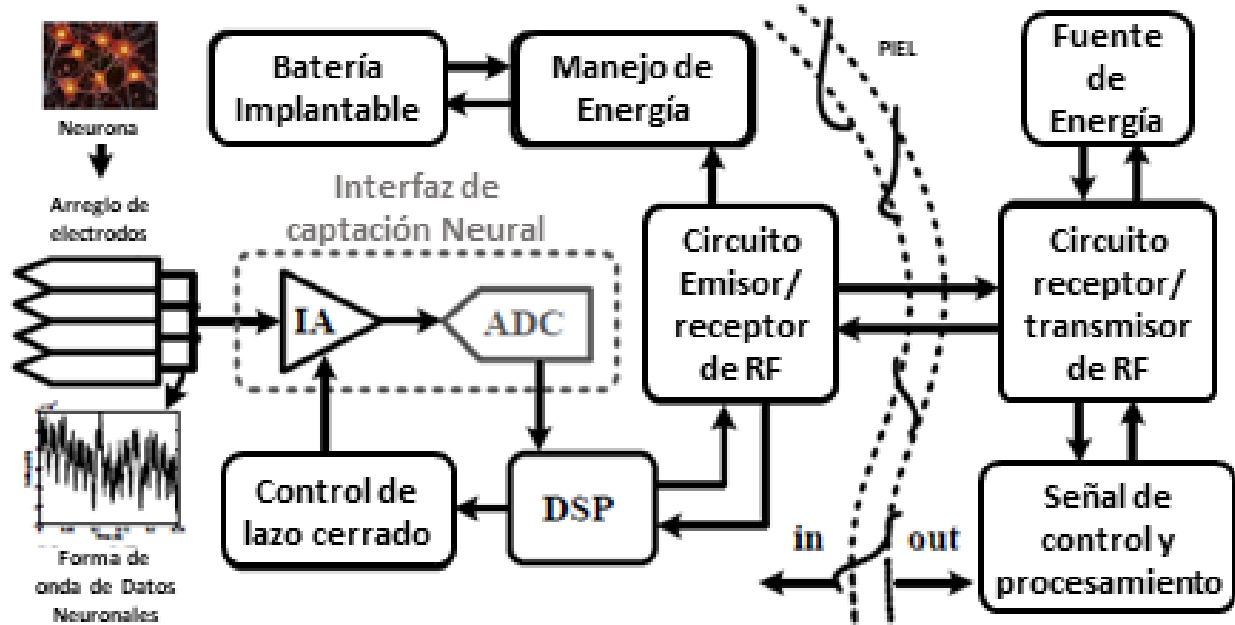


Figura 4. Microsistema de adquisición de datos neuronales inalámbrico.

Diseño micro y nanoelectrónico a bajo voltaje en el pre-diagnóstico médico

Como se mencionó en la sección anterior, el principal problema que enfrentan los sensores biomédicos inalámbricos es la poca energía que provee la batería, la cual es finita y de un corto tiempo de duración. Más aún, este inconveniente se ve agravado cuando los sistemas bioelectrónicos son implantados dentro del cuerpo humano. El ejemplo por excelencia es el marcapasos, cuya instalación implica un riesgo para el paciente, y más aún realizar intervenciones quirúrgicas cada determinado tiempo para cambiar la batería que lo energiza (Figura 5)

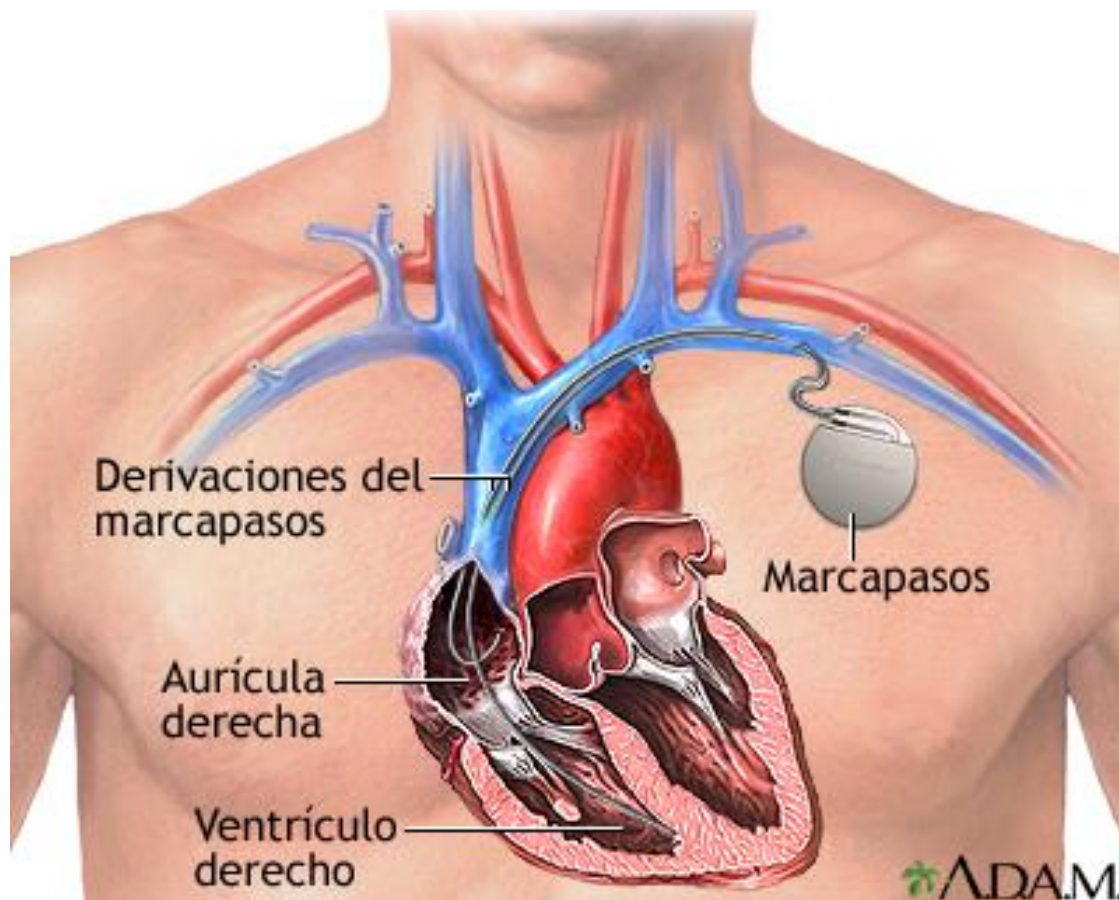


Figura. 5 Marcapasos ventricular.

Gracias a la evolución en los procesos de fabricación Micro y Nanoelectrónico se han desarrollado filosofías de diseño de bajo voltaje y bajo consumo de potencia, a nivel de circuito integrado. Lo anterior ha sido posible debido a la reducción de tamaño en los transistores que componen los sistemas de adquisición de señal analógica y procesamiento digital. Este nivel de reducción ha permitido la integración de millones de transistores en un área no mayor a los milímetros.

Importancia de la modulación Sigma – Delta

Los datos provenientes de las señales sensadas en los sistemas Micro y Nanoelectrónicos obtenidos y registrados, se corrompen a menudo por potenciales no deseados cercanos de gran amplitud. Estos potenciales se desencadenan por una variedad de fuentes como el movimiento de órganos, el movimiento del sujeto, interferencias electromagnéticas y descargas en la superficie del electrodo, siendo estos últimos la interfaz entre el sujeto y el sistema que lo monitorea.

Lo más importante a destacar de una arquitectura Sigma-Delta en Circuito Integrado de tamaños manométricos es su bajo consumo con respecto a cualquier otra arquitectura (Figura 6), esto es medido por una Figura de Mérito 1 [12] [13] [14], que es una forma de mostrar eficiencia con respecto del número de bits efectivos (ENOB) que se logran conseguir en la salida digital del sistema.

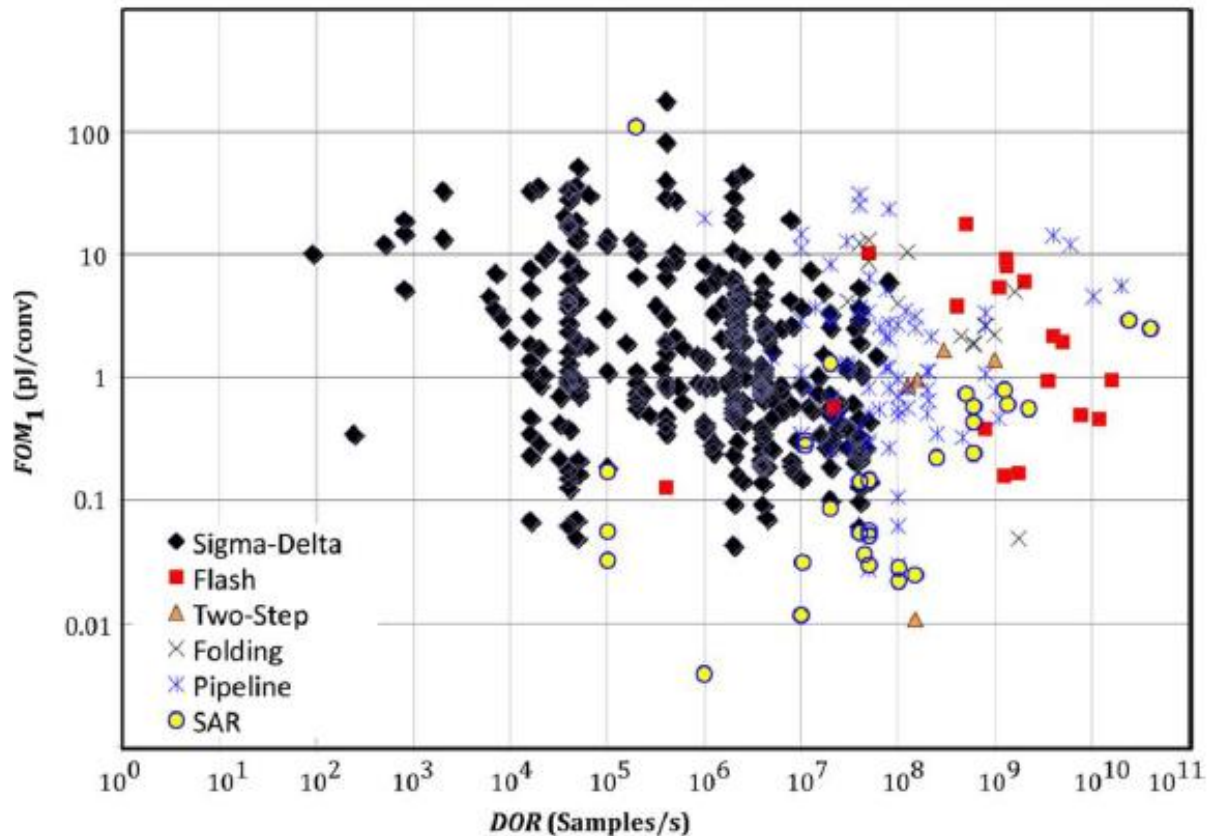


Figura 2. Comparación del desempeño en potencia inherente a la Figura de Merito 1(FOM1).

Para evitar que el sistema se sature y los componentes electrónicos dejen de funcionar se requiere un amplio rango dinámico para la adquisición de datos, lo cual es difícil de lograr ya que se requiere de un área de circuito y potencia excesivos para la implementación. Esta premisa se puede cumplir con la implementación de un modulador Sigma-Delta de alto rendimiento en conjunto con varias técnicas de diseño y bloques de activación para reducir el área del circuito y la potencia consumida. Los moduladores que se diseñan están basados en un proceso CMOS de 180 nanómetros, alimentados por voltajes menores a 0.8V. Empleando esta tecnología, el chip fabricado puede alcanzar una Relación Señal a Ruido de 85 dB y un rango dinámico de 42 dB cuando se integra en un ancho de banda de 10 kHz, que es prácticamente donde se encuentran todas las señales biomédicas actualmente sensadas.

El rendimiento de los sistemas de adquisición de datos biomédicos generalmente está limitado por la precisión de los datos de entrada digital, que se logra en la interfaz entre las señales analógicas y digitales. Los desarrollos recientes en las tecnologías digitales VLSI proporcionan los medios prácticos para implementar los ADC Sigma-Delta. La modulación Sigma-Delta basada en la tecnología de conversión analógica a digital es una alternativa rentable para convertidores de alta resolución (más de 14 bits), que pueden integrarse finalmente en circuitos integrados de procesadores de señales digitales [5].

La alta resolución de los convertidores Sigma-Delta permite la adquisición directa de señales de ECG o EEG, sin el uso de amplificadores de instrumentación [11]. Las señales se pueden digitalizar y el bajo potencial que representa la señal bioadquirida al final del comparador diferencial se puede recuperar con resoluciones comparables a los métodos convencionales [4].

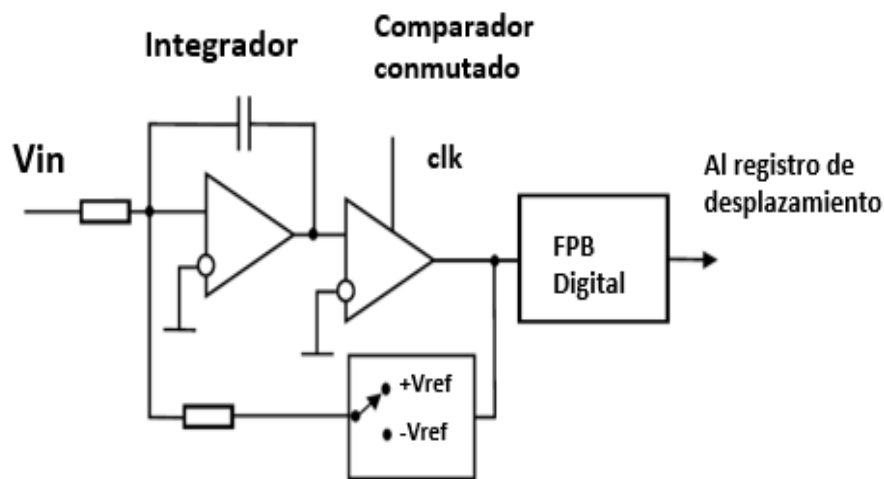


Figura 7. Diagrama a nivel sistema eléctrico de un modulador Sigma-Delta.

Los moduladores Sigma-Delta de primer orden (Figura 7) emplean un bucle de realimentación negativa compuesto por un integrador, un comparador y un convertidor digital a analógico (DAC) de un bit. La señal analógica de entrada se integra primero y se compara con la tierra mediante un comparador de muestreo. Su salida impulsa un DAC de un bit que cambia los voltajes de referencia al nodo de suma del integrador, minimizando la diferencia de señales. El ciclo funciona con una alta relación de sobremuestreo. La palabra de salida se recupera después del filtro digital de paso bajo. Dependiendo del orden del modulador (esto depende de las diferentes etapas que se le añadan al diseño), se puede modelar el ruido que se genera al discretizar la señal mediante “noise shaping” (Figura 8), esto constituye la principal ventaja del modulador Sigma-Delta con respecto a otros tipos, debido que las aplicaciones médicas portátiles requieren minimizar las señales no deseadas en el sistema, y estos reducen

el ruido con la retroalimentación de la arquitectura, además con esto se evita una etapa de filtrado de señal necesaria para solo ocupar el espectro de frecuencias de interés, y con esto la señal biológica se puede procesar digitalmente más adelante en el sistema con menores problemas.

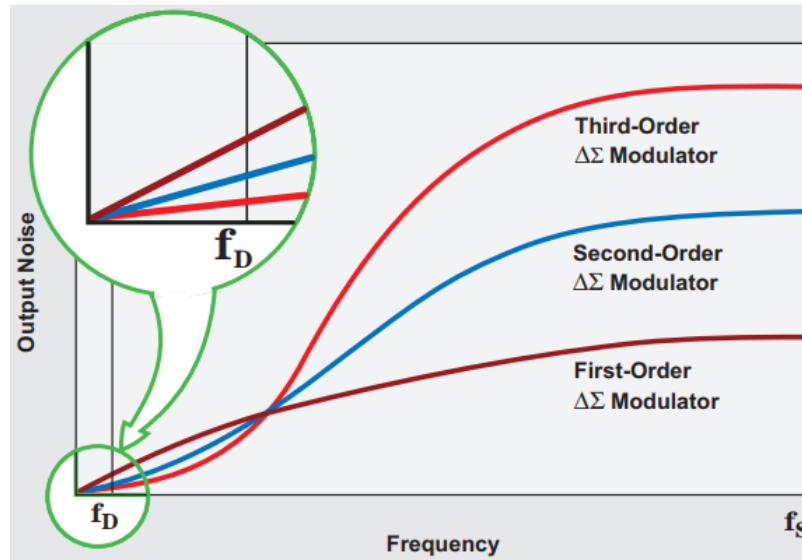


Figura 8. "Noise shaping" en función del orden del modulador.

El diseño del circuito (Figura 9) se hace considerando las características de corriente y voltaje necesarios para la adecuada operación del dispositivo en todas las condiciones de señales sensadas, cubriendo el ancho de banda requerido [10], y sobre todo, teniendo las consideraciones de la tecnología sobre la cual se pretende fabricar el dispositivo. El diseño representa la parte medular del proceso, ya que conjunta la parte teórica con la implementación del sistema requerido.

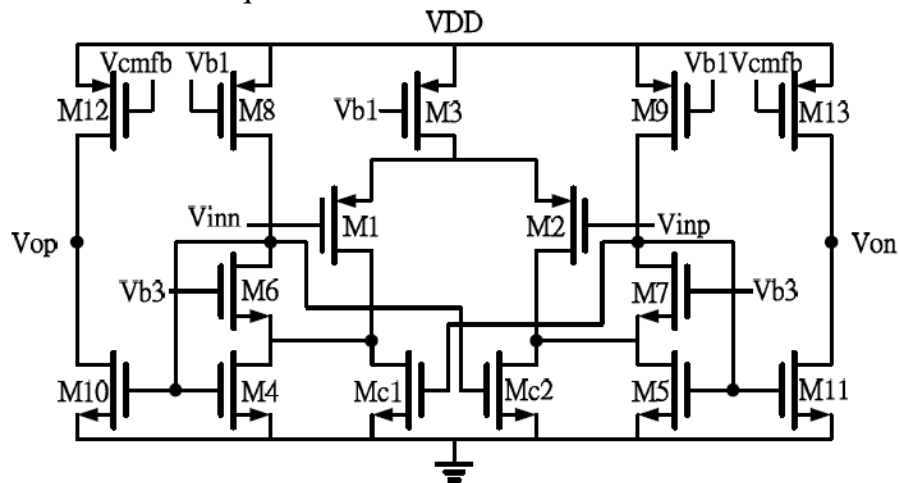


Figura 9. Diagrama esquemático de circuito diseñado como parte del Modulador Sigma-Delta.

Después de la etapa de diseño se prepara la máscara con la que se ha de fabricar el Modulador Sigma-Delta [9], la etapa de diseño requiere de consideraciones finales en la distribución geométrica del chip a implementar, esto es conocido como layout (Figura 10) y se realiza con software especializado que incluye todas las reglas de diseño que la tecnología de fabricación marca como normativas (espacio entre capas semiconductoras, longitud de canal de transistor, parámetros geométricos restrictivos, etc).

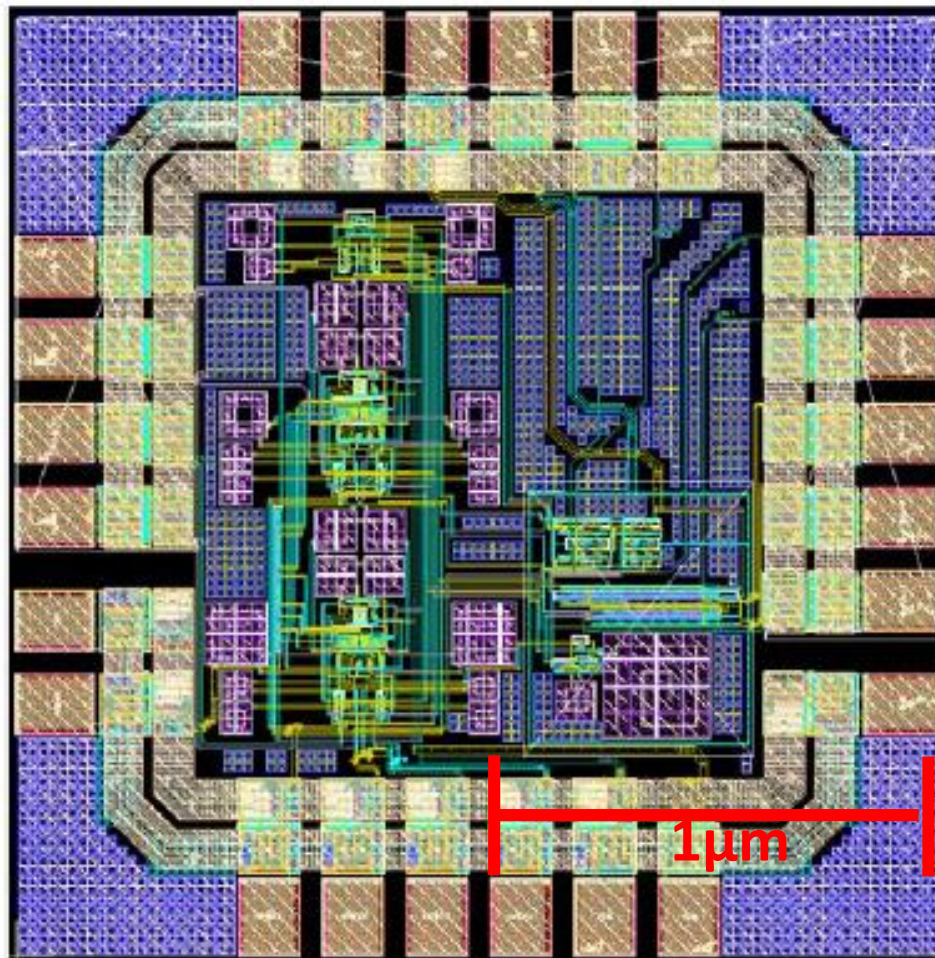


Figura 10. Layout terminado para proceso de fabricación.

Una vez implementado y fabricado el layout se deben medir para corroborar las características diseñadas y proyectadas para satisfacer el diseño nanoelectrónico. En el caso de la tecnología a 180 nm, la velocidad de los dispositivos y las capacitancias generadas por el propio proceso de fabricación causan gran diferencia entre el prototipo diseñado y el obtenido, por lo tanto, se tienen que hacer las mediciones pertinentes de los parámetros de diseño originales.

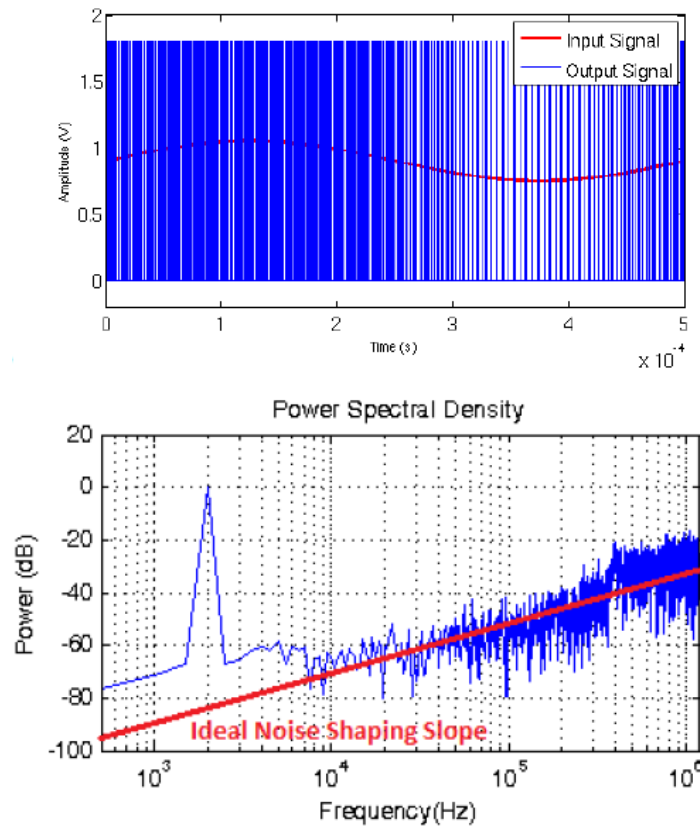


Figura 3. Respuestas típicas de modulador Sigma-Delta, parte superior la respuesta en el dominio del tiempo, parte inferior en el dominio de la frecuencia.

La señal de entrada y la señal procesada (Figura 11), la modulación entrega un espectro de frecuencia marcado y que obedece a la característica “noise shaping” ilustrada en la figura 8, la frecuencia de operación es completamente definida y separada de la banda que comprende al ruido y todos sus efectos.

Conclusiones

Se puede entender que la modulación Sigma-Delta es un bloque importante para la digitalización y procesamiento de señales. Asimismo, la información de un modulador Sigma-Delta en aplicaciones biomédicas y sus potenciales aplicaciones se presentaron, asimismo fueron definidas las señales biomédicas y sus características. Se ha definido la ventaja de esta arquitectura de ultra bajo consumo de energía con respecto a otras topologías de aplicaciones similares. Se concluye y expone la importancia de la línea de diseño que lleva la implementación de este tipo de circuitos integrados, y estado del arte para la consecución de un chip con la etapa de modulación de señal ECG o EMG, mostrando las respuestas típicas que entregan este tipo de sistemas de procesamiento nano-electrónico de señales.

Referencias

- [1] S. E. Noujaim, S. L. Garverick, and M. O'Donnell, Phased array ultrasonic beam forming using oversampled A/D converters, U.S. Patent 5,203,335, 1993.
- [2] International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS, Tech. Rep., <http://public.itrs.net>, 2004.
- [3] Medical Instrumentation-Application and Design, John and G. Webster, Eds., Wiley, New York, pp. 258-259, 1998.
- [4] Marques, V. Peluso, M. Steyaert, and W. Sanden, Optimal parameters for delta sigma modulator topologies, IEEE Trans. Circuits System. II, vol. 46, pp. 359-369, 1999.
- [5] M. Steyaert et al., Switched-opamp, a technique for realizing full CMOS switched capacitor filters at very low voltages, in Proc. 19th Eur. Solid-State Circuits Conf, pp. 178-181, 1993.
- [6] A Baschiroto, R. Castello, and F. Montecchi, Design strategy for lowvoltage SC circuits, Electron. Lett., vol. 30, pp. 378-380, 1994.
- [7] L.Yao, Michael S.J.Steyaert, W.Sansen, A 1v 140uW 88dB Audio Sigma-Delta Modulator in 90nm CMOS, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 39, no. 11, pp. 1809-1818, 2004.
- [8] J. Roh, S. Byun, Y. Choi, H. Roh, Y.-G. Kim, and J.-K. Kee, A 0.9-V 60-uW 1-bit fourth-order delta-sigma modulator with 83-dB dynamic range, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 43, no. 2, pp. 361-370, 2008.
- [9] Baker, Bonnie, Delta-sigma ADCs in a nutshell, part 2: the modulator, EDN, Jan 24, pp. 24. 2008.
- [10] Baker, R Jacob, CMOS Mixed-Signal Circuit Design, J Wiley & Sons, ISBN 0471227544, 2002.
- [11] E.V. Aksenov, Yu.M. Ljashenko, A.V. Plotnikov, D.A. Prilutskiy, S.V. Selishchev, E.V. Vetvetskiy biomedical data acquisition systems based on sigma-delta analogue-to digital converters Conference Paper, DOI: 10.1109/IEMBS.2001.1019540, IEEE Xplore, 2001.
- [12] F. Goodenough, Analog technologies of all varieties dominate ISSCC, Electron. Design, vol. 44, pp. 96-111, 1996.
- [13]R. H.Walden, Analog-to-digital converter survey and analysis, IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 17, pp. 539-550, 1999.
- [14] S. Rabii and B. A. Wooley, A 1.8 V digital-audio sigma-delta modulator in 0.8 um CMOS, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 32, pp. 783-796, 1997.