

Simulador de señales de ECG de muy bajo costo.

Mauricio Pagano¹, Luis Graziani¹, Francisco Naveira²

¹Universidad Autónoma de Entre Ríos, Facultad de Ciencia y Tecnología.
25 de Mayo 385, Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.
mauriciopagano@gmail.com

²Hospital Justo José de Urquiza.
Lorenzo P. Sartorio 2130, Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.

Resumen. Un simulador de señales de ECG (electrocardiograma) genera de manera artificial señales eléctricas conocidas, confiables y repetibles que representan la actividad eléctrica cardíaca, con la finalidad de evaluar periódicamente el funcionamiento de electrocardiógrafos y monitores cardíacos. En el presente trabajo de investigación se propone un simulador de señales de ECG portátil de muy bajo costo, basado en componentes electrónicos de fácil adquisición, de construcción sencilla y capaz de evaluar modernos monitores que poseen funciones de detección en tiempo real de arritmias y registro de variaciones del segmento ST. El diseño está basado en una PC portátil ó teléfono inteligente encargado de generar las formas de onda de las señales hacia el equipo bajo prueba. Estas señales pueden provenir de un banco de señales que representen cardiopatías específicas o bien pueden ser las señales de calibración que recomiendan los estándares internacionales para ensayar este tipo de equipos.

Palabras claves: Simulador de ECG, bajo costo, Physionet, Java, PLL.

1 Introducción

Existen varias alternativas de simuladores de señales de electrocardiograma (ECG), se encuentran equipos comerciales robustos y confiables pero con un alto costo de adquisición, algunos desarrollos con buenas prestaciones pero de relativa complejidad en la fabricación y con costos considerables y otros de bajo costo con información de libre acceso para su construcción, pero con algunas limitaciones en cuanto a las señales a simular [3][6][5][10][9]. Algunos de los simuladores de bajo costo están basados en la síntesis de señales, es decir la señal de ECG a simular es

una señal creada en forma digital por medio de algoritmos matemáticos que luego son convertidos en una señal analógica mediante un conversor digital a analógico D/A ó directamente las ondas P,Q,R,S,T de la curva de ECG son sintetizadas individualmente mediante simples etapas de electrónica analógica. Esta clase de simuladores basados en la síntesis de señales producen señales de ECG con cierta semejanza a una onda real típica, pero sin las irregularidades que pueden presentarse de un paciente a otro. Otro tipo de señales a simular son reproducciones de ondas de ECG adquiridas en mediciones reales sobre pacientes reales, que luego fueron almacenadas en algún formato digital y convertidas nuevamente a señales eléctricas analógicas. Las normas internacionales para ensayar estos equipos recomienda un set de señales de pruebas de ambos tipos. [4][2]

Los simuladores de bajo costo que fueron analizados reproducen un período de la señal de ECG, es decir generan información de un solo “latido del corazón” y repiten esta misma información un período tras otro; este período puede ser de onda sintetizada o real, de cualquiera de las dos maneras esto no es deseable ya que muchas de las funciones que tienen los modernos monitores cardíacos no podrían ser evaluadas con solo la información de “un latido”.

El simulador de ECG es uno de los equipos de prueba importantes en un laboratorio ó taller biomédico. Solo con un probador de este tipo se pueden reparar monitores y electrocardiógrafos, verificar las funciones y las configuraciones de alarma y ubicar fallas típicas de conexiones defectuosas de los cables del paciente. Los simuladores comerciales, generalmente no son asequibles para pequeños talleres de hospitales, especialmente en países en desarrollo. Es por ellos que el objetivo principal de esta investigación es diseñar un simulador de ECG que sea de muy bajo costo y pueda ser construido con componentes de fácil obtención sin limitar las prestaciones del mismo. Una vez desarrollado en su totalidad el simulador, se pretende publicar el diseño completo con los instructivos de fabricación y aplicación de software, para que pueda ser utilizado en hospitales y centros médicos que lo requieran.

2 Materiales y métodos

Para lograr el objetivo de muy bajo costo de construcción manteniendo las prestaciones en cuanto a reproducción de señales, el simulador utiliza una PC portátil ó un teléfono móvil junto con una placa electrónica basada en unos pocos componentes. La PC ó el teléfono corren una aplicación con mínimos requisitos de SW y HW capaces de almacenar, visualizar y reproducir por medio de su interfaz de sonido (placa de audio) las señales de ECG, y la placa electrónica se encarga de acondicionar la amplitud de las señales a niveles de mili-volts.

Podría verse al simulador como un sencillo reproductor de señales de audio seguido de un atenuador resistivo para acondicionar los niveles de amplitud de señal; si bien en principio esto es así, si se tiene en cuenta la composición espectral de las señales de ECG, ricas en componentes de muy baja frecuencia [1] como puede observarse en la gráfica de densidad espectral de potencia (PSD) de la Figura 1, que la mayor concentración de componentes de frecuencia se encuentra antes de los 10 Hz, y considerando la limitación que poseen las interfaces de sonido en reproducir esta clase de señales como puede observarse en la Figura 2 que por debajo de los 10 Hz la respuesta de amplitud vs. frecuencia de las placas de sonido de algunos teléfonos presenta una atenuación considerable, entonces para poder reproducir señales de ECG como simples archivos de audio se debe sortear esta limitación realizando un procesamiento de señal previo a la reproducción.

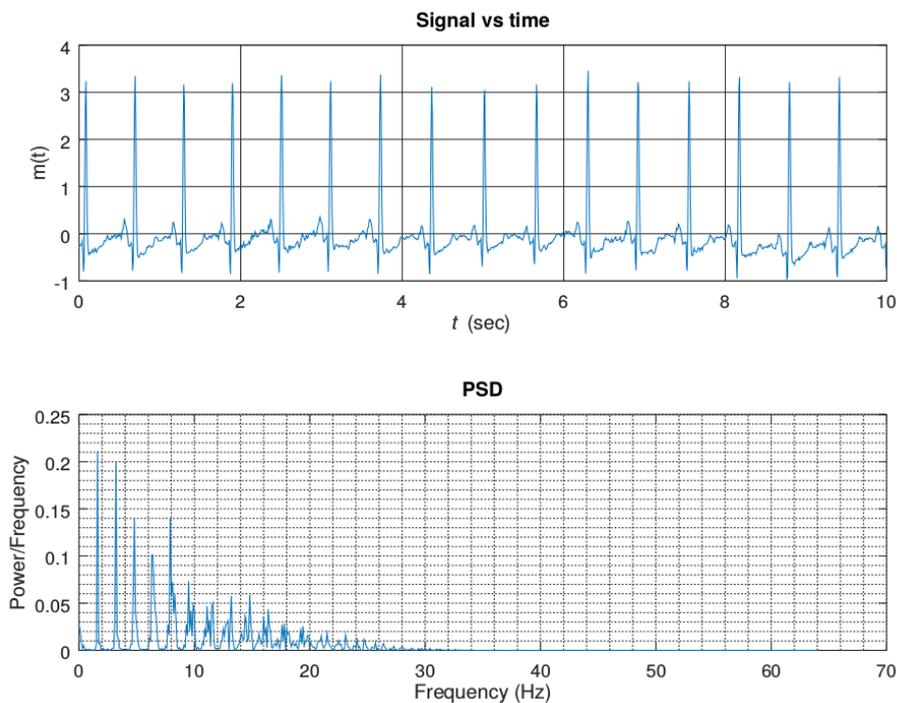


Fig. 1. Registro ECG 16273, Normal Sinus Rhythm, Fs: 128 Hz, MIT Boston's Beth Israel Hospital.

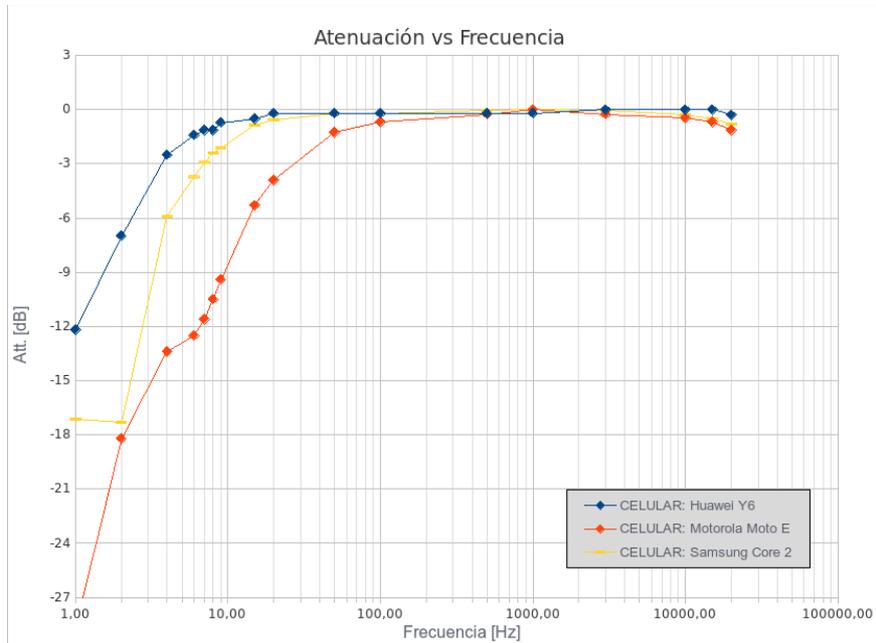


Fig. 2. Respuesta en frecuencia de la interfaz de audio de algunos teléfonos celulares.

La atenuación de amplitud en baja frecuencia de las interfaces de sonido provoca que las componentes de bajas frecuencias presentes en la señal de ECG se vean fuertemente atenuadas y se distorsione la forma de onda a reproducir. Es por esto que previo a la reproducción se efectuó un corrimiento en frecuencia de todo el espectro de señal de ECG modificando (modulando [7]) con la información de la señal de ECG la frecuencia instantánea de otra señal portadora de unos 4khz que no sufre distorsión por atenuación al ser reproducida ya que se ubica en la zona de respuesta plana de la interfaz de audio. De esta manera la PC ó teléfono reproduce un archivo de audio con dicha señal portadora modulada en frecuencia (FM) que lleva impresa la información de la señal de ECG, luego es la placa electrónica del simulador, que está vinculada con un cable de audio con la PC ó teléfono, la que debe recuperar (demodular [7]) esa información y adecuar los niveles de tensión eléctrica que deben estar en el orden de los mili-volts.

El proceso de modulación se realiza por medio de un procesamiento digital de señal, no se hace en tiempo real ya que requeriría otro nivel de recursos de HW y SW, se hace en forma previa a la reproducción mediante un algoritmo realizado en Octave, es decir se prepara la señal antes de usarla, poniendo cuidado en que el an-

cho de banda de la señal portadora modulada esté siempre dentro de la zona de respuesta plana de la placa de audio, esto se consigue limitando el valor del coeficiente de corrimiento de frecuencia a unos 800 Hz/mV como se puede ver en la Figura 3 donde se gráfica la densidad espectral de potencia de esta señal modulada por la señal de ECG de la Figura 1. Luego esta señal se convierte en un archivo digital de audio listo para ser reproducido. Por otro lado el proceso de de-modulación se realiza en forma totalmente analógica en la placa electrónica del simulador, por medio de un circuito PLL demodulador de FM seguido por un filtro activo pasa bajos de Butterworth orden 7. Un esquema conceptual del simulador se puede ver en la Figura 4.

La elección de utilizar una comunicación analógica en lugar de una digital, por ejemplo, enviando la señal digital por el puerto USB desde la PC ó teléfono que reproduce la señal de ECG hasta la placa electrónica que acondiciona las amplitudes, se debe a que de esta manera se pueden utilizar teléfonos de bajo costo que no poseen la tecnología USB OTG (On-The-Go) necesaria en el caso de enviar los datos desde este dispositivo hacia una placa con un microcontrolador con un convertor D/A. Además de que los costos de componentes es algo menor en esta versión analógica, fabricar la interfaz electrónica tiene un costo de alrededor de USD6, esto es fabricando el PCB de manera casera ya que fue diseñado para ser muy simple.

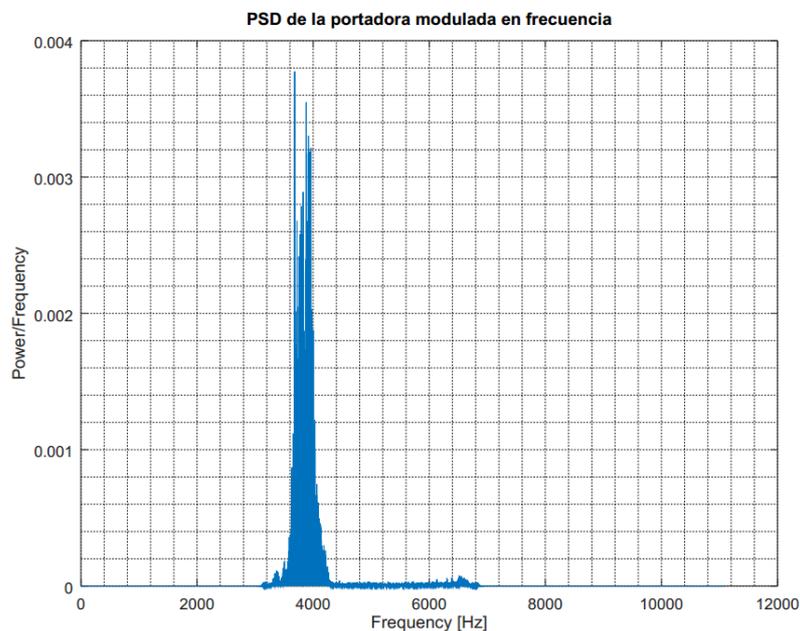


Fig. 3. PSD de la señal portadora modulada por la señal de ECG de Figura 1.

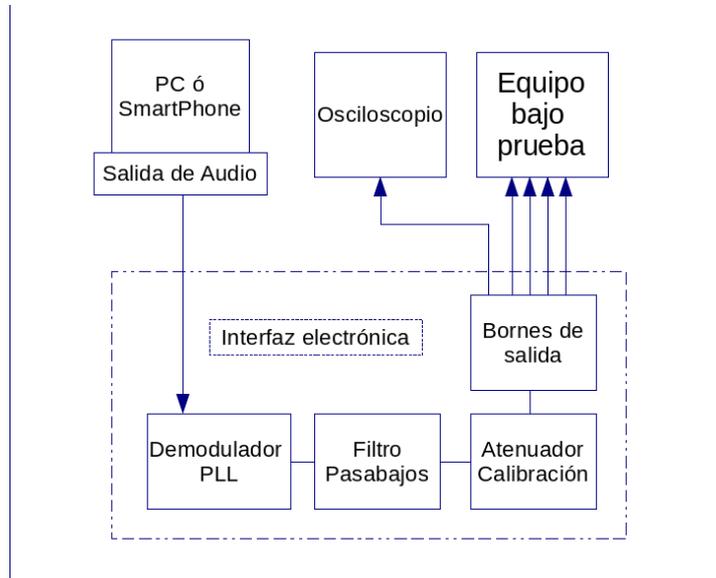


Fig. 4. Diagrama en bloques conceptual del simulador de ECG.

3 Resultados

Se desarrolló una aplicación prototipo en lenguaje Java para PC, por medio de la cual el usuario selecciona de una lista los archivos de audio correspondientes a las señales de ECG a utilizar, la aplicación muestra una gráfica en la pantalla de la señal de ECG original y reproduce por el puerto de audio la señal seleccionada; además la aplicación muestra un cuadro de texto con las características y parámetros particulares de la señal que deben ser detectados por el equipo bajo prueba. Se preparó un conjunto de señales que recomienda la norma ANSI/AAMI EC13:2002 “*Cardiac Monitors, Heart Rate Meters, And Alarms*” [2], estas señales incluyen formas de onda tanto sintéticas como reales. Para obtener detalles sobre estas formas de onda de prueba y cómo usarlas, puede consultar la sección 5.1.2.1, párrafos (e) y (g) de dicha norma.

Se conectó la interfaz electrónica del simulador al puerto de salida de audio analógico de una PC en la cual se instaló la aplicación de SW, a la interfaz electrónica se conectó un monitor Nihon Kohden, donde se verificó la exactitud en la medición de ritmo cardíaco y la respuesta a ritmos irregulares según sección 5.1.2.1 inciso (e) de la Norma ANSI/AAMI mencionada, además se probó según el inciso (g) de

esta norma donde se evaluó el tiempo para activación de alarma por taquicardia, ambas con resultados favorables. Como ejemplo en el inciso (e) de estas pruebas se pide reproducir una señal de ECG real con bigeminismo ventricular, señal “aami3a”, que puede obtenerse de la base de datos Physionet [8], esta señal tiene una duración total del doble complejo de 1500 ms, un ritmo de 80 lpm si se cuentan todos los complejos QRS ó de 40 lpm si solo se cuentan las ondas R más grandes o las ondas S, que el equipo bajo prueba debe detectar.

Respecto de la calibración de amplitudes de las señales a reproducir, en este simulador se puede calibrar solo la derivación I, el resto de las derivaciones son reproducciones escaladas de esta derivación. Para realizar la calibración se genera a través de la aplicación de SW una señal que consiste en un tren de pulsos de amplitud 1 mVpp con muy baja frecuencia y ciclo de actividad de 50%, que tiene un período de 4 segundos lo que deja tiempo suficiente para realizar un ajuste en una resistencia variable en la interfaz electrónica mientras se mide sobre la derivación I con un instrumento voltímetro. Este simulador tiene una salida para conectar un osciloscopio, en la Figura 5 se puede observar una simulación en curso de la señal utilizada en la Figura 1.

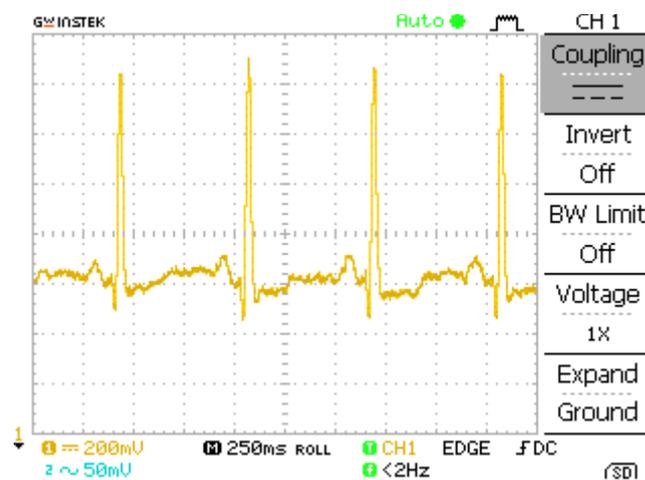


Fig. 5. Captura de pantalla de osciloscopio GW Instek GDS-1062A durante una simulación.

La interfaz electrónica convierte variaciones de frecuencia de la señal portadora en variaciones de amplitud (señal de ECG) y esta relación de frecuencia y voltaje debe ser lineal. Se efectuó una prueba de linealidad en Figura 6, donde comparando la respuesta del simulador con su recta de regresión se obtiene un error máximo por

linealidad del 1,35% entre valores de instantáneos de frecuencia de portadora de 1 Khz y 7 Khz. En cuanto a la respuesta dinámica del simulador se ajustó el filtro de lazo del PLL y el filtro pasa bajos de salida con una frecuencia de corte de 150 Hz suficiente para simular una gran cantidad de señales de ECG.

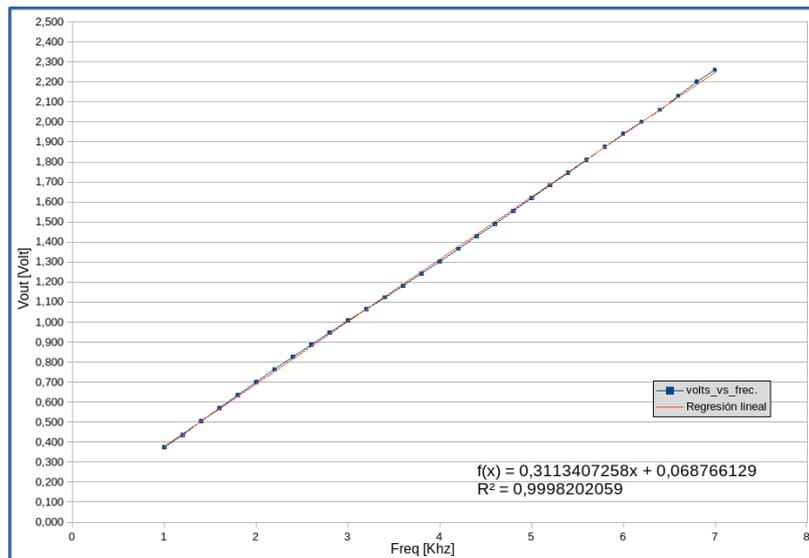


Fig. 6. Gráfica de frecuencia instantánea de entrada vs. tensión de salida de la placa simuladora y recta de regresión de datos.

4 Conclusiones

El simulador diseñado puede generar señales sintéticas y reales, puede simular las señales recomendadas por las normas para ensayar equipos electrocardiógrafos y monitores de paciente. Se realizaron pruebas con las señales recomendadas por la ANSI/AAMI EC13:2002. El simulador puede reproducir señales reales con ritmos normales y diferentes tipos de arritmias.

Este simulador puede ser construido en pequeños talleres de hospitales, especialmente en países en desarrollo, a un muy bajo costo por personal técnico no especializado en fabricación de equipamiento electrónico, con componentes de fácil adquisición.

Se publicará el circuito y toda la información necesaria para la construcción de la interfaz electrónica y el código de la aplicación de SW.

Referencias

1. Bronzino J. (ed.): The Biomedical Engineering Handbook, Vol 1. 2nd Ed. CRC Press LLC. Boca Ratón, USA. (2000)
2. Cardiac monitors, heart rate meters, and alarms [American National Standard (ANSI/AAMI EC13:2002)]. Arlington, VA: Association for the Advancement of Medical Instrumentation (2002)
3. García, A. Simulador de biopotenciales reprogramable basado en microcontrolador 18F14K50 con comunicaciones USB y convertidor D/A por SPI. Universidad Politécnica de Cartagena. (2014)
4. IEC International Standard 601-2-47 Ed. 2 Medical electrical equipment part 2-47: Particular requirements for the basic safety and essential performance of ambulatory electrocardiographic systems, IEC. (2012)
5. Martínez A.E., Rossi E., Nicola Siri L. Microprocessor-based simulator of surface ECG signals. 16 th Argentine Bioengineering Congress, Journal of Physics, doi:101088/1742-6596/90/1/012030. (2007)
6. Mudrov T, Krasteva V, Jekova I. Microcontroller-based ECG simulator prototype, Proceedings of 13 th Int Conf "Electronics 2004", Sozopol, 22-24 September, 2004;1:86-91.
7. Lathi B.P.: Modern Digital and Analog Communication Systems 3rd Ed., Oxford University Press, Inc. New York, NY, USA. (1998)
8. Physiobank: Base de Datos de señales Biomédicas. Disponible en: <https://physionet.org/physiobank/database/aami-ec13/>
9. Samuel E. de Lucena. ECG Simulator for Testing and Servicing Cardiac Monitors and Electrocardiographs. IMEKO TC4, Natal, Brazil. (2011)
10. Valais I., Koulouras G., Fountos G., Design and Construction of a Prototype ECG Simulator. e-Journal of Science & Technology. (2014)