

Diseño y construcción de un sistema basado en acelerometría para la captación y análisis en Matlab de señales precordiales usando sismocardiografía

J. ZULUAGA⁽¹⁾, P. BONAVERI, PHD. ⁽²⁾, M. BARRIOS, MSc.⁽²⁾

(1) juan.zuluaga54@uautonoma.edu.co
Estudiante Investigador Senior
Universidad Autónoma del Caribe
Barranquilla, Colombia

(2) Docente Investigador Tiempo Completo
Universidad Autónoma del Caribe
Barranquilla, Colombia

Diseño y construcción de un sistema basado en acelerometría para la captación y análisis en Matlab de señales precordiales usando sismocardiografía

RESUMEN

Palabras clave:

Acelerometría;

biomedicina; dorso-ventral;

Sismocardiografía.

El presente trabajo muestra los avances en el diseño y construcción de un sistema basado en acelerometría, para la captación y análisis en Matlab, de señales precordiales usando sismocardiografía. Para la medición fue necesario establecer el lugar exacto en el área precordial, para colocar de forma correcta el sensor (acelerómetro de 3 ejes), identificar la señal SCG usando filtros digitales, el análisis del eje dorso-ventral y el sistema de adquisición, donde la información es almacenada para su posterior procesamiento usando MatLab. De las pruebas realizadas y consultas bibliográficas, se ve que el sismocardiógrafo, como dispositivo biomédico para medir la actividad cardíaca, se presenta como una gran opción en la detección de problemas cardíacos de forma prematura, como también en la ayuda de terapias de resincronización cardíaca y otro tipo de enfermedades que son mencionadas en muchos estudios, como problemas coronarios, problemas crónicos del corazón, entre otros.

I. INTRODUCCIÓN

Un gran número de personas alrededor del mundo sufren de enfermedades cardíacas y problemas de circulación [1, 2]. La sismocardiografía (SCG) es la medida de las vibraciones torácicas (área precordial) producidas por la contracción y eyección de sangre de los ventrículos hacia el árbol vascular [3], por lo cual estas señales podrían ser muy eficaces para la identificación de los tiempos cardiacos [4]. El análisis de este fenómeno físico con la SCG tiene aplicaciones en las "Terapias de resincronización cardíaca" y el monitoreo constante de cualquier anomalía cardíaca como las isquemias en el corazón, previamente comentado por Tavakolian Kouhyar [3-4].

La SCG inicialmente fue observada por Bozhenko en 1961, luego de 30 años comenzaron los primeros estudios por Salerno, *et al.* [5]. Sin embargo, debido a la gran ventaja de la ecocardiografía y las imágenes de resonancia magnética (IRM), además del excesivamente engorroso hardware utilizado en esa época, la SCG fue largamente abandonada por la comunidad médica [6]. La necesidad de sistemas económicos, eficaces y portables para la evaluación cardíaca se hace más necesaria día a día. La SCG para ser aceptada como una herramienta de diagnóstico y hasta de pronóstico, debe poseer una validación y estandarización coherente, sin embargo los más recientes estudios se enfocan mucho más en la forma de adquisición y procesamiento de señal, que en el fenómeno físico [7]. Zanetti comparó la SCG con la ecocardiografía (ECO), y encontró que el valor acotado de la ecocardiografía fue $7,9 \pm 8,1$ milisegundos de puntos SCG sistólica y $11,8 \pm 11,5$ milisegundos para puntos SCG diastólica [8].

En estudios médicos sobre vibraciones precordiales, se ha encontrado que muchos errores en la SCG son debido a una ubicación incorrecta de los sensores y la configuración de unidades de medidas separadas [9], por lo cual puede atribuirse a fallas humanas y esto debe estar dentro de las consideraciones para alcanzar sistemas menos propensos a errores [10].

Aunque las mediciones son en los tres ejes (3D-SCG) el estudio se encuentra enfocado en el eje dorso-ventral dejando a un lado los ejes superior-infe-

rior y medial-lateral. En particular se ha demostrado que el eje superior-inferior posee una onda consistente [7] y puede ser determinante para encontrar el volumen sistólico [11].

Hoy en día, los avances en la tecnología permiten que análisis como el Ecocardiograma, admita evaluar el progreso de personas que son sometidas a tratamientos de resincronización cardíaca, pero debido al costoso equipamiento y la dificultad de realizar exámenes clínicos de manera frecuente lo vuelve poco viable, por lo cual la SCG con la posibilidad de realizar exámenes sencillos, constantes y efectivos lo convierten en una gran área de exploración científica.

El presente trabajo pretende el desarrollo de un prototipo de un sistema para la medición de las señales sismocardiográficas, el montaje correcto del sensor (acelerómetro triaxial) en el área precordial, el análisis del eje dorso-ventral y el sistema de adquisición el cual es un P.C donde la información es almacenada para un posterior procesamiento usando MatLab. Se dará una breve introducción sobre el nacimiento de la sismocardiografía como método para la detección de la función cardíaca; se muestra la razón de porque fue abandonado por la comunidad médica en un pasado, además del motivo de su excelente resurgimiento en los últimos años, siendo motivo de exploración médica, el protocolo de medición, sistema de medición y descripción de la señal SCG se detallará de mejor manera en la metodología, los resultados y discusión serán mostrados más adelante y por último se darán las principales conclusiones.

II. METODOLOGÍA

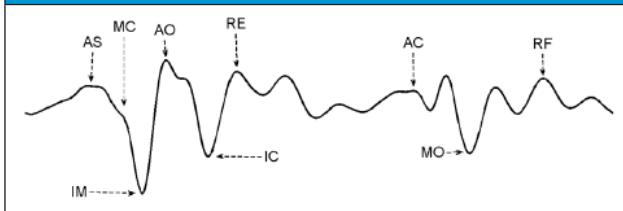
A. Descripción señal Sismocardiográfica

SCG es la medición de las vibraciones torácicas producidas por el corazón debido a la contracción y eyección de sangre en los ventrículos hacia el árbol vascular. Hoy en día estas vibraciones pueden ser medidas colocando simplemente un acelerómetro de bajo ruido en el área precordial, y se puede obtener en los 3 ejes un patrón específico por cada uno, que pueden indicar varias cosas.

Sin embargo, la comunidad científica se ha enfocado en el eje dorso-ventral, el cual es considerado transcendental al poseer información relacionada con:

- Cierre de la válvula mitral, MC
- Contracción isovolumétrica, IVC
- Apertura de la válvula aorta, AO
- Eyección rápida, RE
- Cierre de la válvula aorta, AC
- Apertura de la válvula mitral, MO
- El llenado rápido, RF

Fig. 1. Características representativas del ciclo cardíaco de la señal Sismocardiográfica [15].

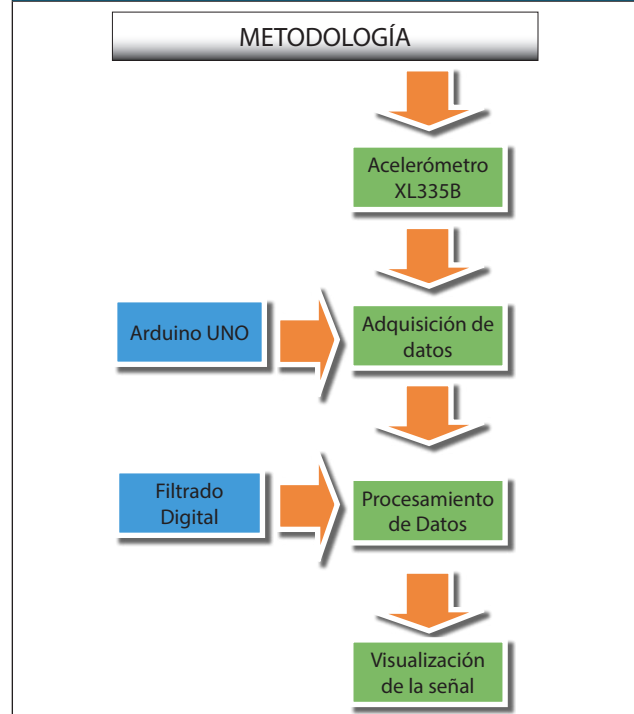


En la Figura 1 se puede observar claramente como son las señales obtenidas en los ejes correspondientes en comparación con la sismocardiografía, el ítem más importante es la comparación entre la SCGx contra ECG, ya que son los que más poseen estudios a nivel bibliográfico, por lo cual es fundamental la observación de sus cambios y diferencias en los puntos de intersección, para poder caracterizar la señal.

B. Sistema de Medición

La Figura 2 muestra el diagrama de bloques correspondiente al sistema de medición sismocardiográfico. Por lo general se usa una frecuencia de muestreo de 240 Hz. El acelerómetro (ADXL 335B) viene diseñado en unas dimensiones de 2cm x 3cm x 2cm, con triple eje de medición, low-power, salida analógica en un rango de 0V-5V que se encuentra acoplado a una váquela con 5 pines, los cuales corresponden a, la alimentación, tierra y 3 salidas analógicas.

Fig. 2. Diagrama de Bloques Sistema de adquisición de datos.



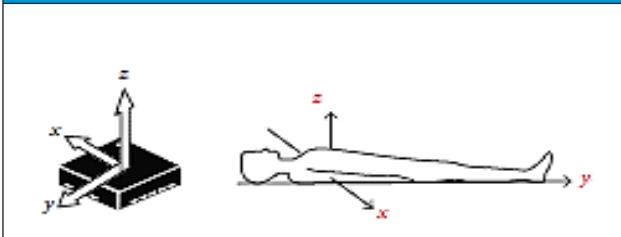
C. Protocolo de Medición

Este estudio se desarrolla en la Universidad Autónoma del Caribe (UAC) por el Grupo de Investigación en Ingeniería Mecatrónica (GIIM). El proyecto se encuentra en fase de validación, donde el sistema consta de un acelerómetro encargado de medir las vibraciones en el área precordial de la persona, una interfaz de conexión entre el acelerómetro y el computador (tarjeta de adquisición de datos) y por último el sistema de procesamiento encargado de analizar la señal fiable con respecto a la bibliografía. La Fig. 1 muestra la aceleración en los ejes y, x y z, donde tenemos el elemento longitudinal (superior-inferior), elemento lateral (medial-lateral) y elemento sagital (dorso-ventral), respectivamente.

Por lo general el sujeto se debe encontrar en reposo y acostado, con la menor inclinación posible para que la señal se mantenga constante, el estudio se encuentra basado en el elemento sagital, debido que es el cual presenta una onda mejor, además de ser el patrón que la comunidad científica ha investigado en su mayoría, sin embargo el elemento

longitudinal presenta la posibilidad de detectar el volumen sistólico del corazón.

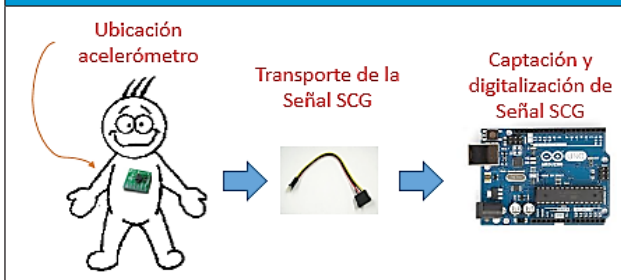
Fig. 3. Posicionamiento y detección del acelerómetro en el cuerpo humano [16].



D. Metodología

El proyecto se desarrolló en tres fases; la primera abarca la selección del acelerómetro (digital o análogo), la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) para el tratamiento digital de la señal y por último la interfaz de comunicación entre el acelerómetro y el DAQ. Se seleccionó el acelerómetro ADXL 335B de analog devices como sensor inercial y el Arduino Uno como DAQ. La Figura 4 explica de manera gráfica desde la ubicación del acelerómetro hasta la captación y digitalización de la señal.

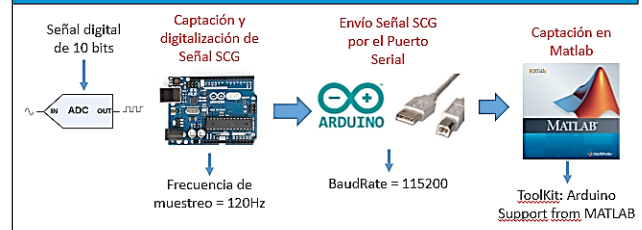
Fig. 4. Esquema gráfico de la Fase 1.



A la Fase 2 le compete la digitalización de la señal con una frecuencia de muestreo de 240 Hz, la cual es óptima para evitar el fenómeno de aliasing; según el criterio de Nyquist la frecuencia de muestreo debe ser de por lo menos el doble de la frecuencia máxima de la señal a muestrear. El rango de frecuencias de la onda SCG es de 0.5 a 50 Hz, por lo cual para evitar el aliasing se debe muestrear mínimo a 100 Hz. Esta etapa también le corresponde el envío de la señal SCG a Matlab donde se usa el puerto serial del Arduino. La Fig. 5 muestra un breve esquema de la Fase 2, donde se destaca la resolución de 10 bits

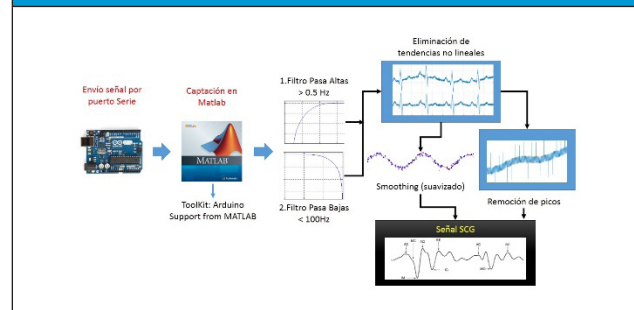
para las señales muestreadas del Arduino y su Toolkit para la comunicación con Matlab.

Fig.5. Esquema gráfico de la Fase 2.



La última Fase incluye todo el tratamiento digital de la señal SCG para su correcta visualización para la detección de los eventos mencionados por Tavakolian Kouhyar [3]. El algoritmo empieza con la lectura por el puerto serial de la señal SCG digitalizada por el Arduino Uno, guardándola en un vector de N valores ($N = \text{número de muestras}$). A la Señal SCG se le aplica un filtrado digital tipo FIR (Equiripple) pasa banda de octavo orden, la banda de paso está entre 0.3-0.5 Hz y 50-55 Hz, con una atenuación de 80 dB. Luego de obtener la señal filtrada se procede a realizar un Smoothing (filtro) para tener eliminar los pequeños picos y obtener una onda más natural con menos ruido. La Figura 6 muestra el procesamiento digital realizado correspondiente a la Fase 3.

Fig. 6. Esquema gráfico Fase 3.



III. RESULTADOS

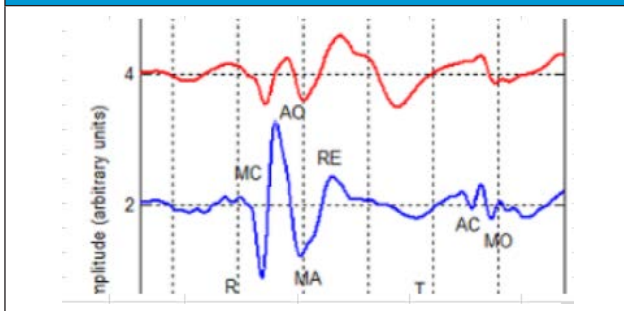
Lo que se pretende es la construcción de un sistema para adquirir señales sismocardiográficas o en otras palabras crear un sismocardiograma, asimismo, este sistema se encuentra compuesto por una parte física, electrónica y una de programación. La parte física se encuentra compuesta por el acelerómetro y la tarjeta de adquisición de datos o DAQ, la etapa de digitalización de señal comprende la

tarjeta de Arduino UNO y el computador personal que posee Matlab. La parte electrónica comprende las conexiones entre las diferentes interfaces, y por último la programación se encuentra desarrollada en Matlab.

A. Primeras mediciones

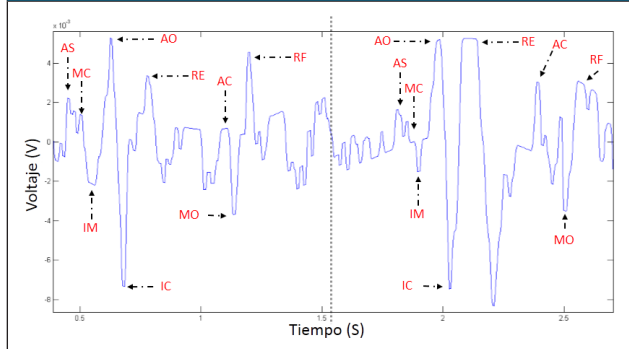
Las primeras mediciones que se realizaron, se basaron en la adquisición de la señal, como se ha presentado en la Figura 2, de forma que se le aplicaba un filtrado digital, FIR, que está realizado con el *Toolkit* FDATool de Matlab, el cual permite la creación de forma rápida y sencilla filtros digitales. Como se mencionó anteriormente la frecuencia de muestreo fue de 240 para evitar el aliasing. El filtro digital realizado comprende las siguientes características, es un filtro FIR pasa banda, de orden 8, Density Factor de 20, posee una frecuencia de 0.5 Hz pasa alta y 100 Hz pasa baja lo cual forma un filtro pasa banda de 0.5Hz - 100Hz. Como se mencionó anteriormente la frecuencia de muestreo era de 240 Hz de forma que se evite el aliasing el cual es indeseado, como también la obtención de una señal clara y concisa. La Figura 7 se tomó de la bibliografía para realizar una pequeña comparación de lo obtenido en las mediciones, con lo que se desea obtener en un fin.

Fig. 7. Gráfica ciclo cardíaco correspondiente a SCGx [7].



La Figura 8 muestra una sección de la señal SCG procesada en Matlab, donde el eje de las ordenadas corresponde a los voltios, mientras que el eje de las abscisas corresponde al tiempo. Cabe resaltar que se le realizó después del filtrado digital, una eliminación de picos, luego un smoothing y por último una supresión de tendencias no lineales, llamado en electrónica como "detrend".

Fig. 8. Medición correspondiente a un ciclo cardíaco, paciente 1.



Se logran identificar los picos claves mencionados en la sección "descripción de la señal sismocardiográfica", la Figura 8 muestra un ciclo cardíaco donde la amplitud es indiferente, debido a que cada persona maneja una frecuencia cardíaca diferente.

IV. DISCUSIÓN

El estudio profundo sobre las características físicas de las enfermedades cardiacas en especial para pre-diagnosticarlas en funciones de las vibraciones generadas en las aperturas y cierres de las válvulas del corazón permitirán realizar un seguimiento y control de las enfermedades a través de sistemas tecnológicos, implementados con los últimos avances de las técnicas de diseño electrónico, procesamiento de señales y de la ingeniería de software.

El Sismocardiógrafo propuesto es otro ejemplo del avance de la instrumentación biomédica para medir la actividad cardíaca y que será de gran ayuda para toda la comunidad médica, auxiliando en la detección de problemas cardíacos de forma prematura, como también en el acompañamiento de terapias de resincronización cardíaca y otro tipo de enfermedades que son mencionadas en muchos estudios, como problemas coronarios, problemas crónicos del corazón, entre otros.

Las tendencias no lineales pueden llegar a perturbar la onda SCG, por lo cual es necesario implementar un algoritmo llamado "detrend", el cual se encuentra referenciado en varias investigaciones sobre Sismocardiografía. La mejor forma para tomar las mediciones es en estado de supinación, debido a

que la gravedad de la tierra no afecta directamente al sensor inercial y se pueden tomar datos más fieles a la morfología de la onda SCG.

V. CONCLUSIÓN

El desarrollo de un sistema para la captación de señales precordiales usando sismocardiografía es un beneficio directo para la comunidad científica, ya que es posible revelar 9 eventos dentro del ciclo cardíaco permitiendo evaluar la actividad del corazón y así poder prediagnosticar e incluso diagnosticar una posible afección.

Se pudieron identificar los puntos de apertura y cierre de la válvula aorta y mitral, lo cual hace la SCG una técnica fácil y útil de aplicar. El desarrollo de filtros digitales ayuda de gran manera a la visualización final de la onda SCG.

Para demostrar esto se diseñó un sistema que inicialmente tomara las vibraciones precordiales por medio de un sensor inercial (acelerómetro) que tuviese un rango de medición bajo ($\pm 1.5g$), ya que estas vibraciones poseen una pequeña magnitud, luego se digitalizara esta señal análoga usando un Arduino Uno, enseguida se es enviada al entorno de Matlab para ser procesada con filtros digitales pasa banda, eliminación de picos, smoothing y supresión de tendencias no lineales.

REFERENCIAS

- [1] J. B. Young. "The global epidemiology of heart failure". *Med Clin North Am* 88: 1135- 1143. 2004.
- [2] Lawes CM, Vander Hoorn S, Rodgers. A. "Global burden of bloodpressure-related disease, 2001". *Lancet* 371: 1513-1518. 2008.
- [3] Inan O, Migeotte P, Park K, Etemadi M, Tavakolian K, Casanella R. et al. "Ballistocardiography and Seismocardiography: A Review of Recent Advances". *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2008.
- [4] Tavakolian K, Ngai B, Blaber AP, Kaminska B. "Infrasonic cardiac signals: complementary windows to cardiovascular dynamics". *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2011: 4275-4278. 2011.
- [5] D. M. Salerno and J. Zanetti, "Seismocardiography for monitoring changes in left ventricular function during ischemia," *CHEST Journal*, vol. 100, pp. 991-993, 1991.
- [6] L. Giovangrandi, T. Inan, R. M. Wiard. "Ballistocardiography: A method worth revisiting" in *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, Annual International Conference of the IEEE*, 2011, pp. 4279-4282. 2011.
- [7] Paukkunen M, Linnavuo M, Haukilehto H, Sepponen R. "A System for Detection of Three-Dimensional Precordial Vibrations". *International Journal of Measurement Technologies and Instrumentation Engineering (IJMTIE)* 2: 52- 66. 2012.
- [8] Zanetti, J., Poliac, M., & Crow, R. "Seismocardiography: Waveform identification and noise analysis". In *Proceedings of the Computers in Cardiology* (pp. 49-52). 1991.
- [9] Hyman, W. A. "Human factors in medical devices". In Webster, J. G. (Ed.), *Encyclopedia of medical devices and instrumentation* (1st ed., pp. 1542-1553). New York, NY: John Wiley & Sons. 1988.
- [10] Sawyer, D. Aziz, K. Backinger, C. Beers, E. Lowery, A., Sykes, S. "An introduction to human factors in medical devices". Washington, DC: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Food and Drug Administration, Center for Devices and Radiological Health. 1996-
- [11] McKay WP, Gregson PH, McKay BW, Militzer J. "Sternal acceleration ballistocardiography and arterial pressure wave analysis to determine stroke volume". *Clin Invest Med* 22: 4-14. 1999.
- [12] R. Crow, P. Hannan, D. Jacobs, et al., "Relationship between seismocardiogram and echocardiogram for the events in the cardiac cycle," *Am J of Noninvasive Cardiol*, vol. 88, pp. 39-46, 1994.
- [13] A. Ahbardeh, K. Tavakolian, V. Gurev, T. Lee, et al. "Comparative analysis of three different modalities for characterization of the seismocardiogram," in *Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 2899-2903, EMBC, 2009.
- [14] V. Gurev, K. Tavakolian, J. Constantino, B. Kaminska, et al., "Mechanisms underlying the isovolumic and ejection peaks in seismocardiogram morphology," *Journal of Medical and Biological Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 103-110, 2012.
- [15] M. Paukkunen, *Seismocardiography: Practical implementation and feasibility*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering and Automation, 2014.
- [16] R. Vidmar, "On the use of atmospheric plasmas as electromagnetic reflectors," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 21, no. 3, pp. 876-880, 1992.