

Revista Sextante

ISSN : 2665-3923

Vol: 20 No: 01(2019)

Desarrollo de un monitor de laboratorio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca

María Cristina Barrios Díaz, Jean Carlos Gilede Garzón

Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia

Gisella Yolanda Borja Roncallo

Área de Ingeniería y Procesamiento de Señales Biomédicas, Colombia

José Alberto Ledesma León

Área de Ingeniería Electrónica y Biomédica, Colombia

Article History

Received Oct , 11th , 2019

Accepted Oct , 15th , 2019

Published Oct, 25th, 2019



© 2019 The Authors. This article is an Open Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Abstract

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) constituye una herramienta cuantitativa y no invasiva ampliamente empleada para estudiar las fluctuaciones existentes entre intervalos cardíacos consecutivos y evaluar indirectamente la modulación del sistema nervioso autónomo sobre el sistema cardiovascular. El análisis de la VFC requiere señales electrocardiográficas de adecuada calidad, una identificación confiable de los complejos QRS y una medición precisa de los intervalos RR. En este contexto, el presente trabajo describe el desarrollo conceptual y funcional de un monitor de laboratorio destinado a la adquisición, procesamiento, visualización y análisis de señales electrocardiográficas para estudios de variabilidad de la frecuencia cardíaca. El sistema se estructura en diferentes etapas funcionales. La primera corresponde a la adquisición de la señal electrocardiográfica mediante electrodos y circuitos de acondicionamiento analógico. Posteriormente, la señal es convertida a formato digital mediante una etapa de conversión analógica-digital. Una vez digitalizada, la información es procesada mediante herramientas desarrolladas en LabVIEW, permitiendo la visualización del ECG, la eliminación de interferencias, la detección de complejos QRS y la construcción de series temporales de intervalos RR. La aplicación de filtros digitales de respuesta finita al impulso (FIR) permite reducir componentes no deseados de la señal y mejorar las condiciones necesarias para detectar los latidos cardíacos. A partir de los intervalos RR obtenidos, el sistema puede calcular parámetros de VFC en el dominio del tiempo, tales como la media de los intervalos NN, SDNN y RMSSD, así como parámetros en el dominio de la frecuencia mediante el análisis espectral. El monitor desarrollado representa una herramienta de laboratorio para investigaciones académicas y experimentales relacionadas con procesamiento digital de señales biomédicas, electrocardiografía y regulación autonómica cardiovascular. Su estructura modular permite además incorporar mejoras futuras relacionadas con almacenamiento de datos, análisis automatizado, interfaces gráficas avanzadas y nuevas técnicas de procesamiento de señales.

Keywords

ECG, variabilidad de la frecuencia cardíaca, VFC, LabVIEW, filtros FIR, procesamiento digital de señales, sistema nervioso autónomo, análisis espectral

INTRODUCTION

La actividad eléctrica del corazón constituye una de las señales fisiológicas más utilizadas para evaluar el funcionamiento cardiovascular. El electrocardiograma (ECG) registra las variaciones de potencial eléctrico generadas durante los procesos de despolarización y repolarización del miocardio, proporcionando información relevante sobre el ritmo y la conducción cardíaca. Además del análisis morfológico tradicional del ECG, la medición de los cambios existentes entre intervalos cardíacos consecutivos permite estudiar la variabilidad de la frecuencia cardíaca. La VFC se relaciona principalmente con las fluctuaciones en la duración de los intervalos RR o NN y refleja, bajo condiciones apropiadas, aspectos de la modulación autonómica cardíaca. El sistema nervioso autónomo interviene en la regulación del corazón mediante sus componentes simpático y parasimpático. La interacción dinámica entre ambos sistemas produce modificaciones continuas en la duración de los ciclos cardíacos. Por esta razón, un corazón fisiológicamente regulado no presenta intervalos idénticos entre todos sus latidos. El análisis de la VFC puede desarrollarse mediante técnicas en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Los métodos temporales emplean parámetros estadísticos derivados directamente de la serie de intervalos NN, mientras que los métodos espectrales permiten analizar cómo la potencia de la variabilidad se distribuye entre diferentes componentes de frecuencia. Para obtener resultados útiles es fundamental disponer de una señal ECG con suficiente calidad. Las interferencias provenientes de la red eléctrica, movimientos del paciente, actividad muscular, desplazamientos de la línea base y ruido electrónico pueden dificultar la identificación de los complejos QRS. El desarrollo de sistemas digitales ha facilitado la implementación de herramientas para adquisición y procesamiento de señales fisiológicas. Plataformas como LabVIEW permiten integrar adquisición de datos, procesamiento digital, análisis matemático y visualización mediante interfaces gráficas. En consecuencia, el desarrollo de un monitor de laboratorio para VFC representa una aplicación interdisciplinaria de electrónica, instrumentación biomédica y procesamiento digital de señales.

El objetivo del presente trabajo es estructurar un sistema capaz de adquirir una señal ECG, acondicionarla, digitalizarla y procesarla para obtener información adecuada para el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca.

Fundamentos fisiológicos de la variabilidad de la frecuencia cardíaca

La frecuencia cardíaca no permanece constante incluso cuando una persona se encuentra en reposo. Los intervalos entre latidos sucesivos presentan pequeñas fluctuaciones que responden a diferentes mecanismos fisiológicos.

Una parte importante de estas fluctuaciones está relacionada con la actividad del sistema nervioso autónomo. El componente simpático tiende a aumentar la frecuencia cardíaca, mientras que la estimulación parasimpática produce generalmente una disminución. La respiración constituye uno de los mecanismos fisiológicos relacionados con cambios periódicos de la frecuencia cardíaca. Durante determinadas condiciones, la frecuencia aumenta durante la inspiración y disminuye durante la espiración, fenómeno conocido como arritmia sinusal respiratoria. Para estudiar estas variaciones se construye una serie temporal a partir de los intervalos entre ondas R consecutivas. Esta serie, denominada serie RR o serie NN cuando se consideran latidos normales, constituye la base del análisis de VFC.

Entre los parámetros temporales más utilizados se encuentra **SDNN**, que representa la desviación estándar de los intervalos NN y refleja la variabilidad global presente durante un registro. Otro parámetro frecuente es **RMSSD**, calculado a partir de las diferencias sucesivas entre intervalos NN. Este indicador es especialmente utilizado para representar componentes de variabilidad de corto plazo. También puede utilizarse el parámetro **pNN50**, que representa el porcentaje de pares de intervalos NN consecutivos cuya diferencia supera 50 milisegundos. En el dominio de la frecuencia se analiza la potencia correspondiente a diferentes bandas espectrales. Convencionalmente pueden distinguirse componentes de muy baja frecuencia, baja frecuencia y alta frecuencia.

La interpretación fisiológica de estas variables debe realizarse cuidadosamente, considerando duración del registro, posición corporal, respiración, actividad física, edad, medicamentos y otras condiciones capaces de modificar la respuesta autonómica.

Sistema de adquisición y acondicionamiento de la señal ECG

La calidad del análisis de VFC depende directamente de la calidad del ECG adquirido. Por esta razón, la etapa de adquisición representa uno de los elementos fundamentales del monitor. Los electrodos colocados sobre la superficie corporal detectan diferencias de potencial producidas por la actividad eléctrica cardíaca. Estas señales presentan amplitudes relativamente pequeñas y requieren una etapa de amplificación adecuada. El amplificador de instrumentación constituye una solución habitual debido a su elevada impedancia de entrada y capacidad para rechazar señales comunes presentes en ambos electrodos. Además de la señal cardíaca, el sistema puede captar diferentes fuentes de ruido. Entre ellas se encuentran interferencias electromagnéticas de la red eléctrica, actividad muscular, movimientos de los cables y desplazamientos lentos de la línea base.

Por esta razón, el acondicionamiento analógico debe reducir las componentes no deseadas antes de realizar la conversión digital. La seguridad eléctrica también constituye un aspecto importante en sistemas que tienen contacto con una persona. El diseño de equipos biomédicos debe considerar aislamiento, limitación de corriente y protección frente a posibles fallas eléctricas. Después del acondicionamiento, la señal es enviada a un convertidor analógico-digital. Este dispositivo transforma las muestras analógicas en valores digitales que pueden almacenarse y procesarse mediante software. La frecuencia de muestreo debe seleccionarse de manera que permita representar adecuadamente las características de la señal ECG y detectar con precisión la ubicación temporal de las ondas R.

Table 1. Principales etapas funcionales del monitor de VFC

Etapas	Función principal	Variable o salida	Importancia
Electrodos ECG	Captación de biopotenciales cardíacos	Señal ECG analógica	Alta
Amplificación	Incremento de amplitud útil	ECG acondicionado	Alta
Filtrado analógico	Reducción inicial de ruido	Señal con menor interferencia	Alta
Conversión A/D	Digitalización de la señal	Muestras digitales	Alta
Filtrado digital FIR	Reducción adicional de componentes no deseadas	ECG digital filtrado	Alta
Detección QRS	Identificación de ondas R	Localización de cada latido	Muy alta
Cálculo RR	Determinación de intervalos entre latidos	Serie RR/NN	Muy alta
Análisis temporal	Cálculo de parámetros estadísticos	SDNN, RMSSD, etc.	Alta
Análisis espectral	Evaluación de componentes de frecuencia	Potencias espectrales	Alta
LabVIEW	Procesamiento y visualización	Interfaz gráfica y resultados	Alta

Procesamiento digital y aplicación de filtros FIR

Una vez digitalizada, la señal ECG puede ser procesada mediante diferentes técnicas orientadas a mejorar su calidad y facilitar la detección automática de complejos QRS. Los filtros digitales constituyen herramientas esenciales porque permiten atenuar determinadas componentes de frecuencia y conservar aquellas asociadas con la información de interés. Los filtros FIR, o filtros de respuesta finita al impulso, presentan características particularmente útiles cuando se requiere controlar la respuesta de fase y mantener estabilidad durante el procesamiento. Un filtro FIR puede diseñarse mediante diferentes ventanas y órdenes de filtrado. La selección depende de las frecuencias que deben conservarse y aquellas que deben atenuarse. En una señal ECG pueden aparecer componentes de baja frecuencia originadas por movimientos respiratorios o variaciones de la línea base. También pueden presentarse interferencias de alta frecuencia asociadas con actividad muscular y ruido electrónico.

Otra fuente importante es la interferencia producida por la red eléctrica. Dependiendo del sistema de suministro eléctrico, esta interferencia aparece generalmente alrededor de 50 o 60 Hz. Después del filtrado, la detección del complejo QRS se convierte en una etapa crítica. El objetivo es identificar correctamente cada onda R porque cualquier error puede alterar de manera importante los intervalos RR. Una detección falsa añade un intervalo inexistente, mientras que una onda R no detectada puede producir un intervalo artificialmente largo. Ambos errores modifican las métricas temporales y espectrales de la VFC.

Por esta razón, la visualización del ECG junto con los puntos detectados facilita verificar el funcionamiento del algoritmo.

Implementación del sistema en LabVIEW

LabVIEW constituye una plataforma de programación gráfica ampliamente utilizada en instrumentación, adquisición de datos y desarrollo de sistemas de laboratorio. Una de sus principales ventajas consiste en representar los procesos mediante diagramas de bloques, facilitando la integración entre dispositivos de adquisición, funciones matemáticas y elementos gráficos. Dentro del monitor de VFC, LabVIEW puede utilizarse para recibir los datos provenientes de la etapa de conversión analógica-digital y representarlos gráficamente en tiempo real.

La interfaz puede incluir una ventana principal para observar el ECG, controles relacionados con la adquisición y módulos para mostrar los parámetros calculados.

Después del filtrado y la detección de ondas R, el software determina los intervalos entre latidos consecutivos. La serie RR puede visualizarse en forma de tacograma, donde cada punto representa la duración de un intervalo cardíaco sucesivo. A partir de esta serie pueden obtenerse medidas estadísticas como:

Media RR: promedio de todos los intervalos considerados.

SDNN: desviación estándar de los intervalos normales.

RMSSD: raíz cuadrática media de las diferencias sucesivas entre intervalos.

pNN50: porcentaje de diferencias sucesivas superiores a 50 ms.

LabVIEW permite además implementar algoritmos de análisis espectral. Mediante transformadas y herramientas de procesamiento se puede estimar la distribución de potencia en diferentes bandas de frecuencia.

La integración de procesamiento y visualización en una misma plataforma convierte al monitor en una herramienta adecuada para prácticas académicas y estudios experimentales.

Análisis de la VFC en el dominio del tiempo y de la frecuencia

El análisis temporal constituye una de las estrategias más directas para estudiar la variabilidad de la frecuencia cardíaca. Los parámetros temporales pueden obtenerse mediante operaciones estadísticas sobre los intervalos NN y no requieren necesariamente una transformación de la señal.

SDNN proporciona una medida de la variabilidad global del registro. Sin embargo, su interpretación depende de la duración total del registro, por lo que los valores obtenidos en registros cortos y largos no deben compararse indiscriminadamente.

RMSSD se utiliza frecuentemente en registros de corta duración y se encuentra relacionado con cambios rápidos entre intervalos sucesivos.

El análisis en el dominio de la frecuencia permite estudiar la distribución espectral de la serie RR.

Las recomendaciones clásicas para estudios de VFC describen bandas como:

- **VLf:** muy baja frecuencia.
- **Lf:** baja frecuencia.
- **Hf:** alta frecuencia.

La componente HF está estrechamente relacionada con la modulación respiratoria y parasimpática. La interpretación de LF y especialmente del cociente LF/HF requiere mayor precaución y no debe reducirse automáticamente a una medición simple de “balance simpático-parasimpático”. Para el análisis espectral pueden utilizarse métodos como la transformada rápida de Fourier, periodogramas y técnicas autorregresivas. El monitor desarrollado puede facilitar la comparación entre la representación temporal y espectral, permitiendo que estudiantes e investigadores observen cómo determinadas modificaciones en la secuencia RR producen cambios en los parámetros calculados.

Validación, utilidad y posibles aplicaciones

Para que un monitor de laboratorio resulte útil, no basta con visualizar correctamente una señal. Es necesario comprobar que la adquisición y el procesamiento conservan la información requerida para el análisis. Una primera etapa de validación consiste en verificar que la forma de onda ECG permanezca reconocible después del acondicionamiento y filtrado. También debe comprobarse que la detección de complejos QRS coincida con los eventos observados visualmente. La serie RR obtenida puede compararse con registros generados mediante equipos de referencia o programas validados cuando estos estén disponibles. La reproducibilidad representa otro aspecto relevante. Registros adquiridos en condiciones comparables deberían producir mediciones coherentes dentro de los límites fisiológicos esperados. En el ámbito académico, el monitor puede emplearse para explicar conceptos de instrumentación biomédica, acondicionamiento analógico, conversión A/D, filtros digitales, análisis temporal y procesamiento espectral. También puede utilizarse como plataforma experimental en proyectos relacionados con ejercicio, respiración, postura, estrés fisiológico y modulación autonómica. No obstante, un sistema desarrollado con fines de laboratorio no debe considerarse automáticamente un dispositivo médico diagnóstico. La utilización clínica requiere procesos adicionales de validación, seguridad, regulación y comparación con equipos médicos certificados.

Gráfico 1. Representación conceptual del flujo de procesamiento del monitor de VFC

Para ilustrar la contribución de cada etapa puede emplearse el siguiente índice conceptual:



Etapa	Índice ilustrativo de importancia
Adquisición ECG	88
Acondicionamiento	82
Conversión A/D	80
Filtrado FIR	85
Detección QRS	95
Cálculo RR	95
Análisis de VFC	90
Visualización LabVIEW	78

Summary

La variabilidad de la frecuencia cardíaca constituye una herramienta no invasiva para estudiar las variaciones existentes entre ciclos cardíacos consecutivos y obtener información relacionada con la regulación autonómica del sistema cardiovascular. La confiabilidad del análisis depende principalmente de la correcta adquisición de la señal ECG y de la determinación precisa de los intervalos RR. El desarrollo del monitor integra diferentes disciplinas, incluyendo instrumentación electrónica, adquisición de señales biomédicas, conversión analógica-digital, procesamiento digital y programación gráfica. La etapa de adquisición debe proporcionar una señal con suficiente calidad y amplitud para permitir su posterior procesamiento. Los filtros digitales FIR representan una herramienta adecuada para disminuir componentes no deseadas y facilitar la identificación de los complejos QRS.

La detección correcta de las ondas R constituye una de las etapas de mayor importancia, debido a que los parámetros de VFC se calculan directamente a partir de las diferencias temporales entre latidos. LabVIEW permite integrar adquisición, procesamiento, visualización y análisis mediante una interfaz interactiva. Los parámetros temporales como SDNN y RMSSD ofrecen información cuantitativa sobre diferentes aspectos de la variabilidad de los intervalos cardíacos. El análisis espectral complementa estas medidas mediante la evaluación de cómo la potencia de las fluctuaciones se distribuye entre diferentes bandas de frecuencia. El sistema puede utilizarse principalmente como herramienta educativa y experimental para estudios de electrónica biomédica y procesamiento de señales fisiológicas. El diseño modular ofrece además posibilidades de expansión mediante almacenamiento automático, algoritmos adicionales, comparación de sujetos, análisis estadístico y nuevas interfaces. Finalmente, el desarrollo de herramientas de bajo costo para adquisición y análisis de VFC puede facilitar prácticas de laboratorio y proyectos interdisciplinarios relacionados con fisiología, ingeniería biomédica e instrumentación electrónica.

Referencias

- Barrios Díaz, M. C., Gilede Garzón, J. C., Borja Roncallo, G. Y., & Ledesma León, J. A. (2019). Desarrollo de un monitor de laboratorio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca. *Revista SEXTANTE*, 20, 55–63.
- Berntson, G. G., Bigger, J. T., Jr., Eckberg, D. L., Grossman, P., Kaufmann, P. G., Malik, M., Nagaraja, H. N., Porges, S. W., Saul, J. P., Stone, P. H., & van der Molen, M. W. (1997). Heart rate variability: Origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*, 34(6), 623–648.

- Clifford, G. D., Azuaje, F., & McSharry, P. (Eds.). (2006). *Advanced methods and tools for ECG data analysis*. Artech House.
- Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., Glass, L., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. C., Mark, R. G., Mietus, J. E., Moody, G. B., Peng, C. K., & Stanley, H. E. (2000). PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet. *Circulation*, 101(23), e215–e220.
- Malik, M. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, 93(5), 1043–1065.
- Pan, J., & Tompkins, W. J. (1985). A real-time QRS detection algorithm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, BME-32(3), 230–236.
- Porras Álvarez, J., & Bernal Calderón, M. O. (2019). Variabilidad de la frecuencia cardiaca. *Duazary*, 16(2), 259–269.
- Rodríguez-Triviño, C. Y. (2019). Variabilidad de la frecuencia cardiaca como factor predictor de las enfermedades cardiovasculares. *Revista Colombiana de Cardiología*, 26(4), 205–210.
- Rodas, G., Pedret, C., Ramos, J., & Capdevila, L. (2008). Variabilidad de la frecuencia cardíaca: concepto, medidas y relación con aspectos clínicos. *Archivos de Medicina del Deporte*, 25(123), 41–47.
- Sörnmo, L., & Laguna, P. (2005). *Bioelectrical signal processing in cardiac and neurological applications*. Elsevier Academic Press.
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17(3), 354–381.
- Tompkins, W. J. (Ed.). (1993). *Biomedical digital signal processing: C-language examples and laboratory experiments for the IBM PC*. Prentice Hall.