

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	1/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Manual de Prácticas de Laboratorio

Análisis de Bioseñales

Elaborado por:	Revisado por:	Autorizado por:	Vigente desde:
Dr. Didier Torres Guzmán	Dr. Luis Jiménez Ángeles Dr. Miguel Serrano Reyes	Dra. Zaida Estefanía Alarcón Bernal	24 de enero de 2025

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	2/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Índice de prácticas

01. Muestreo de señales analógicas y operaciones básicas de procesamiento digital
02. Sistemas de tiempo discreto. Análisis y procesamiento de señales de electrocardiografía

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	3/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 1

Muestreo de señales analógicas y operaciones básicas de procesamiento digital

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	4/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Corriente alterna	Electrocución
2	Posible contaminación por virus informático y/o hackeo	Daño en el equipo de cómputo y pérdida de información

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	5/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

OBJETIVOS

1. Comprender las diferencias entre las señales de tiempo continuo y las señales de tiempo discreto a partir de su representación gráfica.
2. Analizar la influencia de la frecuencia de muestreo durante la adquisición de señales analógicas.
3. Implementar operaciones básicas de procesamiento digital de señales.

EQUIPOS Y HERRAMIENTAS DIGITALES

- Equipo de cómputo con sistema operativo Windows 10 o superior.
- Herramienta computacional MATLAB (versión R2020a o superior).

INDICACIONES

- a. Para la realización del laboratorio es necesario conocer y estudiar las funciones **plot(...)** y **stem(...)**.
- b. A la sesión de laboratorio deben llevar la solución teórica de los incisos 1.4.1 y 2.2 ya que son fundamentales para la realización de las actividades prácticas asociadas.
- c. Durante la sesión de laboratorio sólo se realizarán las actividades prácticas.
- d. Las actividades en las que se solicite el planteamiento de explicaciones, argumentaciones y/o comentarios serán realizadas por cada equipo para la entrega del informe correspondiente.
- e. Todas las funciones que serán utilizadas durante la realización de la práctica de laboratorio, y que están resaltadas con letras en negritas, son funciones definidas en MATLAB. Las características, la forma de utilización, ejemplos de uso, etc. de dichas funciones pueden ser consultadas en: <https://la.mathworks.com/help/releases/R20XXZ/index.html> (donde: **XX** se corresponde con los dos últimos dígitos del año y **Z** con la versión de MATLAB que esté instalada en el equipo de cómputo).

ACTIVIDADES

1. Considere la siguiente señal de tiempo continuo:

$$x(t) = \cos(2\pi Ft), \quad -\infty < t < \infty$$

Dado que dicha señal se ha descrito de forma matemática, su versión muestreada puede describirse con valores tomados cada T_s segundos (período de muestreo). La señal muestreada quedará definida mediante:

$$x(n) = x(nT_s) = \cos\left(2\pi \frac{F}{F_s} n\right), \quad -\infty < n < \infty$$

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	6/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 1.1. Represente gráficamente las señales de tiempo continuo, $x(t)$, y de tiempo discreto, $x(n)$, para una frecuencia de muestreo de 5 kHz y para $F = 0.5, 2, 3$ y 4.5 kHz. Utilice un objeto **figure** para las señales de tiempo continuo y otro para las señales de tiempo discreto y muestre cada una en áreas diferentes. Utilice la función **plot(...)** para la representación de las señales de tiempo continuo en función del tiempo (en segundos) y la función **stem(...)** para la representación de las señales de tiempo discreto en función del número de muestras, n , con $0 \leq n \leq 99$. Optimice el código utilizando un ciclo **for**.
- 1.2. Explique las similitudes y las diferencias entre las señales de tiempo discreto obtenidas en el inciso anterior.
- 1.3. Asuma para la señal de tiempo continuo una $F = 2.5$ kHz y que se adquiere con un convertidor AD que tiene una frecuencia de muestreo de 50 kHz. Determine la frecuencia, f , de la señal de tiempo discreto, $x(n)$, obtenida tras el muestreo, y represéntela gráficamente utilizando la función **stem(...)**.
- 1.4. La señal $x(n)$, obtenida en el inciso anterior, se coloca a la entrada un sistema de procesamiento que toma únicamente sus muestras pares para conformar la señal de salida, $y(n)$.
 - 1.4.1. Obtenga, teóricamente, la relación de entrada-salida del sistema descrito anteriormente.
 - 1.4.2. Implemente la funcionalidad del sistema de procesamiento. Como resultado, se debe representar gráficamente, en el mismo objeto **figure**, en áreas diferentes y utilizando la función **stem(...)**, tanto la señal de entrada como la señal de salida del sistema.
2. Los tres primeros armónicos (componentes de frecuencias) de una señal de audio captada por un transductor se filtran analógicamente con el objetivo de eliminar las componentes de frecuencias no deseadas. Después del filtrado la señal de tiempo continuo se representa por:

$$x(t) = 1.9 \cdot \sin(2000\pi t) + 3.9 \cdot \sin(6000\pi t) + 5.9 \cdot \sin(12000\pi t)$$

De la señal anterior se adquieren 200 muestras con un convertidor AD que opera a una frecuencia de muestreo desconocida F_s . La señal de tiempo discreto obtenida, $x(n)$, se procesa con un sistema cuya respuesta es la señal de tiempo discreto $y(n)$, y que realiza las siguientes operaciones:

- Submuestra la secuencia de tiempo discreto $x(n)$ a una tasa igual a la mitad de la frecuencia de muestreo utilizada por el convertidor.
- Desplaza $k = 6$ muestras la señal resultante y la amplifica por un factor de 3.
- Adiciona una componente de corriente directa de valor 2 en la señal final.

- 2.1. La señal $x(t)$ se muestrea con un convertidor AD que opera a una frecuencia de muestreo de:

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	7/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- a. F_s = la frecuencia de Nyquist.
- b. F_s = 4 kHz
- c. F_s = 60 kHz.

Represente gráficamente, con la función **stem(...)** y para cada caso, la señal de tiempo discreto, $x(n)$, obtenida tras el muestreo y explique a qué se deben las diferencias obtenidas.

- 2.2. Obtenga, teóricamente, la relación de entrada-salida para el sistema descrito anteriormente.
- 2.3. Represente gráficamente, con la función **stem(...)**, la señal de tiempo discreto, $y(n)$, obtenida después del procesamiento de la señal de tiempo discreto, $x(n)$, con el sistema descrito. Suponga para este inciso una frecuencia de muestreo $F_s = 60$ kHz.

BIBLIOGRAFÍA

MathWorks. *MATLAB Documentation*. Natick, Massachusetts: MathWorks Inc. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/matlab/>.

Alan V. Oppenheim y Ronald W. Schaffer. *Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto*. Prentice Hall/Pearson, 3era Edición. 2012. ISBN-10: 8483227185, ISBN-13: 978-8483227183.

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Biosenales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	8/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Práctica 2

Sistemas de tiempo discreto. Análisis y procesamiento de señales de electrocardiografía

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	9/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Corriente alterna	Electrocución
2	Posible contaminación por virus informático y/o hackeo	Daño en el equipo de cómputo y pérdida de información

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	10/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

PARTE I

OBJETIVOS

1. Analizar señales de electrocardiografía en el dominio del tiempo.
2. Caracterizar señales de electrocardiografía en el dominio del tiempo (estimación de energía, eliminación de tendencias no lineales, etc.).
3. Verificar el cumplimiento de las propiedades de la secuencia de autocorrelación para señales reales.

EQUIPOS Y HERRAMIENTAS DIGITALES

- Equipo de cómputo con sistema operativo Windows 10 o superior.
- Herramienta computacional MATLAB (versión R2020a o superior).
- Base de datos *Physionet*. Disponible en: <https://archive.physionet.org/cgi-bin/atm/ATM>

INDICACIONES

- a. Para la realización de la **PARTE I** del laboratorio es necesario estudiar y conocer lo relacionado con las funciones **`xcorr(...)`** y **`detrend(...)`**.
- b. Durante la realización de la **PARTE I** del laboratorio sólo se realizarán las actividades prácticas.
- c. Todas las funciones que serán utilizadas durante la realización de la práctica de laboratorio, y que están resaltadas con letras en negritas, son funciones definidas en MATLAB. Las características, la forma de utilización, ejemplos de uso, etc. de dichas funciones pueden ser consultadas en: <https://la.mathworks.com/help/releases/R20XXZ/index.html> (donde: **XX** se corresponde con los dos últimos dígitos del año y **Z** con la versión de MATLAB que esté instalada en el equipo de cómputo).
- d. Si no se especifica en la actividad correspondiente, todas las representaciones gráficas serán realizadas utilizando la función **`plot(...)`**.

ACTIVIDADES

1. Las señales de ECG son utilizadas para evaluar el funcionamiento de la actividad del músculo cardíaco. Una de las acciones más útil y comúnmente realizada en este tipo de señales, es la detección de las ondas R. La onda R es la primera deflexión positiva dentro del complejo QRS, y representa la despolarización ventricular, es decir, la propagación del impulso eléctrico a través de los ventrículos, lo que conduce a su contracción. La morfología, amplitud y duración de la onda R varían dependiendo de la posición del corazón en el tórax, la edad del paciente, y la presencia de condiciones cardíacas subyacentes.

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	11/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

Se ha diseñado un sistema para el registro y análisis de la actividad eléctrica del corazón. El sistema incorpora una etapa de conversión analógica a digital, que opera a una frecuencia de muestreo de 360 Hz, y una etapa de amplificación basada en un amplificador de instrumentación con una ganancia fija de 200. Con el sistema diseñado se ha adquirido, durante 1 min, una señal de ECG, y la información relacionada ha sido digitalizada y almacenada en el fichero suministrado para su posterior análisis y procesamiento.

- 1.1.** Represente gráficamente, en el mismo objeto **figure** y en áreas diferentes, la señal de ECG suministrada, tanto en unidades de segundos como en función del número de muestras.

Nota: El fichero *ecg_signal.mat* suministrado consiste en un arreglo unidimensional denominado **val** que contiene 21600 elementos, utilice únicamente los primeros 10000.

- 1.2.** Desarrolle un programa que permita estimar la energía de la señal de ECG suministrada.

Nota: La energía, E , de una señal de tiempo discreto, $x(n)$, puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$E = \sum_{n=n_1}^{n_2} |x(n)|^2$$

- 1.3.** Utilizando la función **xcorr(...)** obtenga y grafique la secuencia de autocorrelación para la señal de ECG. Verifique que el valor de la autocorrelación para retardo cero coincide con la energía estimada en el inciso anterior.
- 1.4.** Como se puede observar, en la representación gráfica realizada en el inciso 1.1, la señal de ECG muestra un comportamiento irregular conocido como tendencia no lineal. Utilizando la función **detrend(...)** elimine la tendencia no lineal que experimenta la señal y represente gráficamente la nueva señal procesada.

PARTE II

OBJETIVOS

1. Realizar la implementación de ecuaciones en diferencias lineales con coeficientes constantes.
2. Procesar y caracterizar señales de electrocardiografía en el dominio del tiempo (estimación de la relación señal a ruido, promediado, eliminación de tendencias lineales, cálculo de retardos, etc.).

EQUIPOS Y HERRAMIENTAS DIGITALES

- Equipo de cómputo con sistema operativo Windows 10 o superior.
- Herramienta computacional MATLAB (versión R2020a o superior).

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	12/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- Base de datos *Physionet*. Disponible en: <https://archive.physionet.org/cgi-bin/atm/ATM>

INDICACIONES

- Para la realización de la **PARTE II** del laboratorio es necesario estudiar y conocer lo relacionado con las funciones **snr(...)**, **finddelay(...)** y **mean(...)**.
- Durante realización de la **PARTE II** del laboratorio sólo se realizarán las actividades prácticas.
- Las actividades teóricas y de investigación serán realizadas por cada equipo para la entrega del informe correspondiente.
- Las actividades en las que se solicite el planteamiento de explicaciones, argumentaciones y/o comentarios serán realizadas por cada equipo para la entrega del informe correspondiente.
- Todas las funciones que serán utilizadas durante la realización de la práctica de laboratorio, y que están resaltadas con letras en negritas, son funciones definidas en MATLAB. Las características, la forma de utilización, ejemplos de uso, etc. de dichas funciones pueden ser consultadas en: <https://la.mathworks.com/help/releases/R20XXZ/index.html> (donde: **XX** se corresponde con los dos últimos dígitos del año y **Z** con la versión de MATLAB que esté instalada en el equipo de cómputo).
- Si no se especifica en la actividad correspondiente, todas las representaciones gráficas serán realizadas utilizando la función **plot(...)**.
- Las respuestas a las actividades de la sección **Cuestionario** deben ser incluidas en el informe de la práctica.

ACTIVIDADES

- Un sistema LTI de tiempo discreto y de respuesta finita al impulso (*Finite Impulse Response, FIR*) puede ser realizado, tanto con un sistema recursivo como con un sistema no recursivo. Un ejemplo de un sistema con estas características es el sistema utilizado para determinar la media móvil de una secuencia $x(n)$. La versión recursiva, de orden M , de dicho sistema muestra una relación de entrada-salida caracterizada por la siguiente ecuación en diferencias lineal con coeficientes constantes:

$$y(n) = y(n-1) + \frac{1}{M+1} [x(n) - x(n-M-1)]$$

- Obtenga, teóricamente, la respuesta al impulso del sistema y muestre que efectivamente tiene longitud finita.
- Desarrolle un programa para la implementación de la ecuación en diferencias que caracteriza la relación de entrada-salida del sistema de media móvil, y utilícelo para procesar la señal de ECG obtenida en el inciso 1.4. Represente gráficamente, en el mismo objeto **figure** y en áreas diferentes, la señal de entrada y la señal de salida del sistema. De acuerdo con los resultados obtenidos comente sobre la función realizada por dicho sistema.

Nota: Para comprobar la operación del sistema implementado utilice los siguientes valores para el orden del sistema: $M = 2, 10, 18, 24$ y 50 .

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	13/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería	Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos		
La impresión de este documento es una copia no controlada			

- 2.2.1. ¿Qué ocurre con la morfología de la señal de salida del sistema a medida que M aumenta? Argumente.
- 2.3. Uno de los indicadores más utilizados para caracterizar una señal en presencia de ruido es la relación señal a ruido (*Signal to Noise Ratio*, SNR).
- 2.3.1. Investigue y documente de manera breve cómo se define dicho indicador, para qué se utiliza y cuál es su importancia.
- 2.3.2. Utilizando la función **snr(...)** determine la SNR de la señal de ECG antes y después del procesamiento realizado con el sistema implementado para cada uno de los valores de M propuestos anteriormente. Comente los resultados obtenidos.
- 2.4. Como se puede observar con las representaciones realizadas en el inciso 2.2, existe un retardo en la señal a la salida del sistema implementado con respecto a la señal de entrada.
- 2.4.1. Determine, utilizando la función **finddelay(...)**, el retardo (en número de muestras) experimentado por la señal de salida con respecto a la señal de entrada y para cada uno de los valores de M propuestos anteriormente.
- 2.4.2. ¿Qué ocurre con el retardo determinado en el inciso anterior a medida que M aumenta?
- 2.4.3. Utilizando la función **xcorr(...)** y con $M = 10$, obtenga y grafique la secuencia de correlación cruzada entre las señales de entrada y de salida del sistema. Verifique que el valor donde ocurre el máximo de la correlación cruzada coincide con el retardo determinado en el inciso 2.4.1.
- 2.5. Como se puede observar con las representaciones realizadas en el inciso 2.3, a la salida del sistema implementado la señal muestra un desplazamiento vertical que se corresponde con una componente de corriente directa inducida durante el procesamiento. Utilice la función **mean(...)** para estimar el valor de dicha componente y, una vez estimada, elimínela de señal a la salida del sistema implementado con $M = 10$.

CUESTIONARIO

Realice una investigación y documente, en no más de dos cuartillas, sobre la serie temporal de intervalos RR extraída de una señal de ECG.

- Utilizando la función **findpeaks(...)** y seleccionando los umbrales adecuados, realice la detección de las ondas R en la señal de ECG obtenida en el inciso 2.6. Represente gráficamente la señal de ECG junto con las ondas R detectadas.
- Las ondas R detectadas en el inciso anterior conforman una serie de datos que se conoce como serie temporal de intervalos RR y es utilizada, entre otras cosas, para la estimación de la frecuencia cardíaca y el análisis de la variabilidad de esta. Represente gráficamente la serie temporal de intervalos RR, destaque el rango de dicha serie y estime la frecuencia cardíaca. Comente los resultados obtenidos.

	Manual de Prácticas de Laboratorio de Análisis de Bioseñales	Código:	MADO-103
		Versión:	01
		Página	14/14
		Sección ISO	8.3
		Fecha de emisión	24 de enero de 2025
Facultad de Ingeniería		Área/Departamento: Laboratorio de Sistemas Biomédicos	
La impresión de este documento es una copia no controlada			

BIBLIOGRAFÍA

MathWorks. *MATLAB Documentation*. Natick, Massachusetts: MathWorks Inc. Disponible en:
<https://la.mathworks.com/help/matlab/> [Acceso: 30 de octubre de 2024].

Alan V. Oppenheim y Ronald W. Schaffer. *Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto*. Prentice Hall/Pearson, 3era Edición. 2012. ISBN-10: 8483227185, ISBN-13: 978-8483227183.