



Digitalización y Filtrado de Datos

Integrantes:

Cristóbal Camarena Hernández - A01642653

Victor Jaziel Coronado Flores - A01644090

Rodrigo Yael Morales Luna - A01637721

Omar Michel Carmona Villalobos - A01644146

Inteligencia artificial avanzada para la ciencia de datos I

Grupo: 101

September 15, 2025

1 Introducción

El análisis de señales en series de tiempo es fundamental para aplicaciones en bioingeniería, telecomunicaciones y control. En esta práctica se trabajó con señales ECG provenientes del repositorio MIT-BIH Arrhythmia Database, con el objetivo de aplicar un proceso de digitalización (submuestreo y cuantización) y posteriormente evaluar el desempeño de dos técnicas de filtrado: el filtro de Kalman y el observador de Luenberger.

El propósito principal fue comparar el efecto de cada etapa del procesamiento sobre la preservación de la información relevante de la señal y cuantificar la eficiencia de los filtros aplicados.

2 Implementación

2.1 Dataset

Se seleccionó el registro **209** del MIT-BIH, con una frecuencia de muestreo original de 360 Hz y un tamaño de señal de 650,000 muestras. El conjunto de datos corresponde a señales electrocardiográficas (ECG), las cuales presentan componentes en el rango de 0.5 a 40 Hz que contienen la información fisiológicamente más relevante.

2.2 Digitalización

El proceso de digitalización de la señal analógica simulada incluyó:

- **Submuestreo:** La señal original a 360 Hz se redujo a 60 Hz, lo cual limita el rango de frecuencias preservadas hasta 30 Hz según el teorema de Nyquist.
- **Cuantización:** Se redujo la resolución en amplitud, discretizando la señal en un número menor de niveles respecto a la señal original.

2.3 Filtros

Se implementaron dos filtros de estimación de estados:

- **Filtro de Kalman:** Estimador recursivo que minimiza el error cuadrático medio bajo supuestos de linealidad y ruido gaussiano.
- **Observador de Luenberger:** Estimador determinista que corrige la dinámica del sistema mediante realimentación de error.

3 Resultados

3.1 Comparación temporal

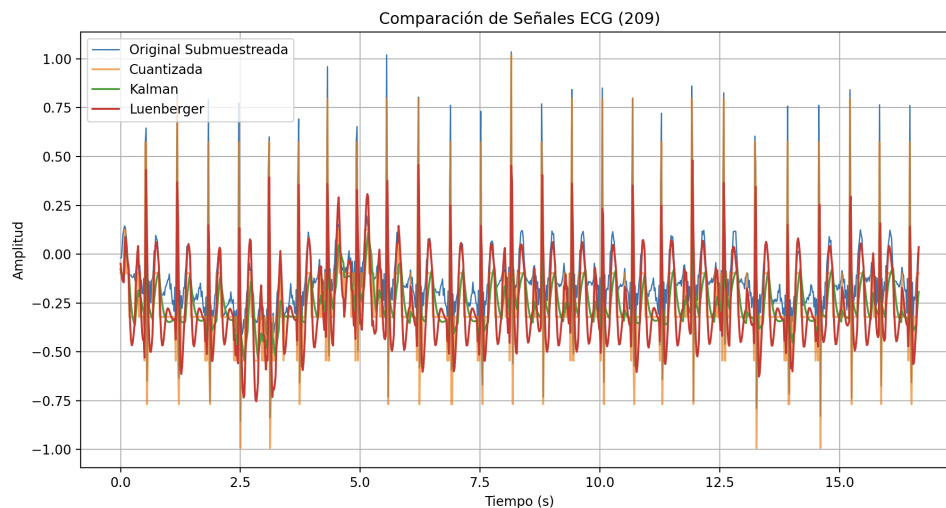


Figure 1: Comparación de señales ECG: Original submuestreada, cuantizada, filtrada con Kalman y con Luenberger.

El filtro de Kalman produce una señal más cercana a la original en comparación con el observador de Luenberger. Este último tiende a amplificar ciertas oscilaciones, generando mayor error en picos y variaciones rápidas.

3.2 Espectro de frecuencia

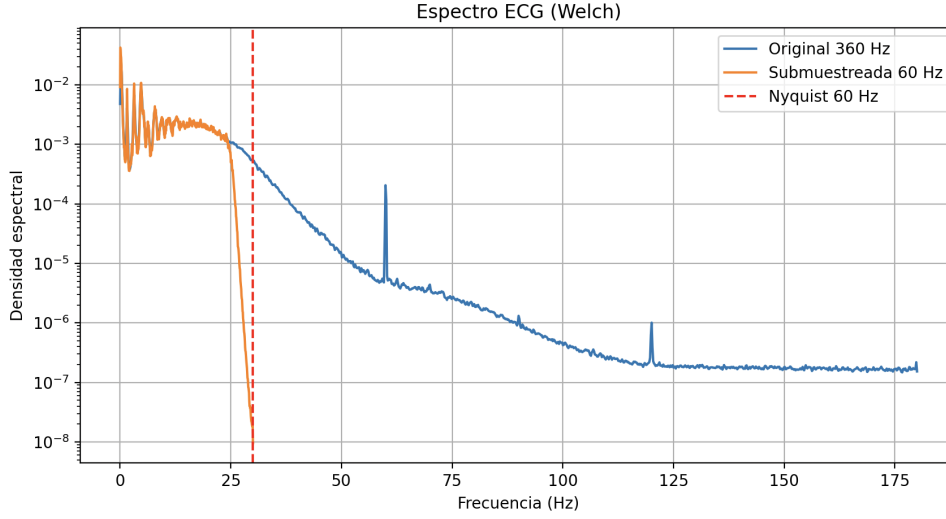


Figure 2: Espectro estimado mediante método de Welch para señal original (360 Hz) y submuestreada (60 Hz).

El espectro muestra que tras el submuestreo a 60 Hz, la señal conserva información hasta 30 Hz, acorde con el límite de Nyquist. Esto asegura la preservación de los componentes principales del ECG, aunque con pérdida de detalle en altas frecuencias.

3.3 Métricas cuantitativas

Se evaluaron las señales filtradas con las siguientes métricas:

- MSE Kalman: 0.0484
- MSE Luenberger: 0.0533
- SNR Kalman: 2.72 dB
- SNR Luenberger: 2.31 dB

Los resultados muestran que el filtro de Kalman obtiene un menor error cuadrático medio y mayor relación señal-ruido respecto a Luenberger.

4 Discusión

El filtro de Kalman presenta un mejor desempeño tanto en el dominio temporal como en las métricas cuantitativas, mostrando mayor capacidad para preservar la morfología de la señal ECG tras la digitalización.

El observador de Luenberger, aunque más sencillo y menos costoso computacionalmente, introduce errores más notorios en las transiciones rápidas de la señal. En aplicaciones donde la fidelidad del ECG es crítica (detección de arritmias, diagnóstico clínico), Kalman resulta más adecuado.

5 Mejoras Propuestas

Aunque los resultados muestran que el filtro de Kalman supera al observador de Luenberger, existen ajustes que podrían mejorar aún más el desempeño:

- **Ajuste de parámetros:** Optimizar la matriz de covarianza del ruido en el filtro de Kalman o la ganancia en el observador de Luenberger para mejorar la fidelidad.
- **Cuantización adaptativa:** Emplear más niveles de cuantización en los rangos de amplitud más críticos para conservar detalles relevantes del ECG.
- **Frecuencia intermedia:** Probar submuestreos a frecuencias ligeramente mayores (p.ej. 100 Hz) para balancear entre reducción de datos y preservación de información espectral.

Estas mejoras podrían reducir el error y aumentar la relación señal-ruido sin incrementar significativamente la complejidad computacional.

6 Conclusión

Se concluye que el proceso de submuestreo y cuantización permite simular la digitalización de señales continuas, con pérdida de detalle en frecuencias altas. En cuanto a los filtros, el de Kalman se muestra superior frente al observador de Luenberger, ofreciendo menor error y mayor SNR.

Este análisis evidencia la importancia de seleccionar correctamente los parámetros de muestreo y el tipo de filtro dependiendo de la aplicación: precisión diagnóstica (Kalman) o simplicidad de implementación (Luenberger).